

# **Optische Diagnose an singulären Tropfen auf polymeren Isolierstoffoberflächen im elektrischen Feld**

**– Ein Beitrag zur Charakterisierung von Phänomenen  
bei der Einleitung von Alterungsvorgängen –**

Vom Fachbereich 18  
– Elektrotechnik und Informationstechnik –  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

## **Dissertation**

von  
**Dipl.-Ing. Sabine Keim**  
geboren am 10.04.1971 in Frankfurt am Main

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Dieter König
Korreferentin:	Prof. Dr. rer. nat. habil. Ursula van Rienen
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen
Tag der Einreichung:	01.11.2002
Tag der mündlichen Prüfung:	01.04.2003

## Übersicht

In der vorliegenden Arbeit wird das Verhalten von singulären Tropfen im elektrischen Wechsel- und Gleichfeld auf polymeren Isolierstoffoberflächen der Hochspannungstechnik untersucht. Das Ziel der experimentellen Untersuchungen ist eine Mechanismenklärung in der Alterungsfrühphase hydrophober Isolierstoffoberflächen.

Zur Untersuchung elektrohydrodynamischer Prozesse an singulären Tropfen wird eine Versuchstechnik entwickelt, die eine Analyse des Tropfenverhaltens im elektrischen Feld ermöglicht. Mit zwei digitalen optischen Diagnosesystemen, bestehend aus einem Randwinkel-Meßsystem und einem Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem, können Phänomene an Tropfen und zwischen Tropfen bei gleichzeitiger Spannungsbeanspruchung untersucht werden. In den Experimenten werden Oberflächenveränderungen und Verformungen der Tropfen, die Ausbildung von Flüssigkeitsspuren an Tropfen und das Zusammenfließen von mehreren singulären Tropfen analysiert. Bei der Auswahl der Versuchsparameter werden trotz Vereinfachungen bezüglich der Prüfkörpergeometrie und der Eingrenzung der zahlreichen möglichen Einflußgrößen realitätsnahe Parameter gewählt, die zuvor in theoretischen Vorüberlegungen zusammengestellt werden.

Mit den geometrischen Kenngrößen eines Tropfenprofils, dem Radius, dem Randwinkel und der Tropfenhöhe, werden Verhaltensmuster für die Beschreibung der Tropfenbewegungen aufgestellt und diese anhand von Beispielen verdeutlicht. Feld- und Kräfteberechnungen geben Informationen über die Ursachen der Bewegungen der Tropfen. Die Untersuchungen zeigen die Bedeutung der elektrohydrodynamischen Prozesse für die Alterung von polymeren Isolierstoffoberflächen. Die Ergebnisse der Arbeit werden in ein bekanntes Alterungsmodell eingeordnet.

## **Abstract**

### **Optical Diagnostic of Single Droplets on Polymeric Insulating Surfaces in an Electric Field – A Contribution to the Characterization of Phenomena Initiating Aging Mechanisms –**

In this thesis the behavior of single droplets on polymer surfaces of high voltage application are observed in an electric ac and dc field. The aim of the experimental investigation is to clarify mechanisms occurring on hydrophobic surfaces in the very early stage of aging.

To study hydrodynamic processes on single droplets experimental techniques have been developed, which enable an analysis of the behavior of the droplets in the electric field. The application of two optical diagnostic systems - a contact angle measuring system and a high speed video system - makes it possible to study the phenomena occurring on droplets and between them during high voltage application. Based on experiments the structures on the surface of the droplets, deformations, the forming of filaments on the droplets and the collapsing of several droplets are analyzed. The choice of the applied parameters is close to reality despite of a simplification with regard to the shape of the insulating specimen. A limited number of suitable parameters were selected based on preceding considerations.

The geometric characteristics of a droplet profile – such as radius, contact angle and height of the droplet – enable to propose different patterns suitable to describe the movements of the droplets. These are illustrated by means of some examples showing a typical droplet behavior. Field calculations and force calculations provide additional information about the origin of the movement of the droplets. The investigations show the importance of electrohydrodynamic processes on aging polymer insulating surfaces, which finally may lead to aging. The results of this work are integrated into a well known aging model.

# Inhalt

<b>Übersicht.....</b>	<b>i</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>ii</b>
<b>Inhalt .....</b>	<b>iii</b>
<b>1      Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2      Stand der Forschung .....</b>	<b>6</b>
2.1    Feuchte Fremdschichten auf Isolierstoffoberflächen.....	6
2.1.1    Innenraum- und Freiluftbedingungen .....	6
2.1.2    Vergleich der Schaltanlagentypen in der Mittelspannungstechnik .....	9
2.1.3    Innenraumanlagen unter erschwerten Umgebungsbedingungen .....	11
2.1.4    Der Begriff Alterung.....	14
2.1.5    Oberflächenalterung unter Innenraumbedingungen .....	15
2.1.6    Oberflächenalterung unter Freiluftbedingungen.....	18
2.2    Flüssigkeiten im elektrischen Feld – Tropfeninstabilitäten.....	19
2.3    Wassertropfen auf Isolierstoffoberflächen im elektrischen Feld.....	20
2.3.1    Tropfenbeläge, Fremdschichten und singuläre Tropfen .....	20
2.3.2    Überschlagsmechanismen.....	21
2.3.3    Teilentladungen an singulären Tropfen .....	25
2.3.4    Versuchstechniken zur Analyse von Tropfen auf Isolierstoffoberflächen .....	27
2.4    Berechnungen von Feuchte auf Isolierstoffoberflächen .....	28
2.4.1    Anwendungen von Simulationsrechnungen .....	28
2.4.2    Modellierung des Überschlagsverhaltens und des Ableitstroms .....	28
2.4.3    Modellierung abfließender Fremdschichten auf einer schiefen Ebene.....	29
2.4.4    Modellierung flächiger Fremdschichten auf Isolierstoffoberflächen .....	29
2.4.5    Modellierung singulärer Tropfen auf Isolierstoffoberflächen .....	30
<b>3      Ziele der vorliegenden Arbeit .....</b>	<b>32</b>
3.1    Einordnung in das Gesamtthema .....	32
3.2    Zielsetzungen .....	36
<b>4      Theoretische Betrachtungen .....</b>	<b>38</b>
4.1    Die physikalischen Eigenschaften von Wasser .....	38
4.2    Erscheinungsformen des Wassers.....	40
4.2.1    Aggregatzustände.....	40
4.2.2    Der feste Aggregatzustand von Wasser .....	41
4.2.3    Der flüssige Aggregatzustand von Wasser .....	42
4.2.4    Der gasförmige Aggregatzustand von Wasser.....	43
4.2.5    Verdunstung.....	45
4.2.6    Kondensation .....	46
4.3    Wassermengen der Erde .....	47
4.3.1    Wasserkreislauf.....	47
4.3.2    Verweilzeiten des Wassers .....	48

4.4	Inhaltsstoffe und Leitfähigkeiten von Wasser .....	49
4.4.1	Klassifikationen des Wassers.....	49
4.4.2	Inhaltsstoffe im Regenwasser .....	49
4.4.3	Inhaltsstoffe im Meerwasser .....	51
4.4.4	Leitfähigkeiten .....	52
4.5	Niederschlag .....	53
4.5.1	Definition des Niederschlags .....	53
4.5.2	Fallender Niederschlag .....	53
4.5.3	Abgesetzter Niederschlag .....	54
4.5.4	Größe von Regentropfen .....	54
4.6	Die Relevanz des Wassers bei Alterungsuntersuchungen .....	56
4.7	Hydrophobie .....	58
4.7.1	Ein Tropfen auf einer Isolierstoffoberfläche .....	58
4.7.2	Definition des Randwinkels.....	60
4.7.3	Der statische Randwinkel und der dynamische Randwinkel.....	61
4.7.4	Die Randwinkelhysterese .....	62
4.7.5	Mechanismen der Hydrophobie.....	63
4.7.6	Bewertung der Hydrophobie.....	64
4.8	Der Lotuseffekt .....	67
4.8.1	Das Prinzip des Lotuseffektes.....	67
4.8.2	Fertigungstechnologien einer Nanostruktur .....	69
4.8.3	Technische Ausführungen einer Mikrostruktur .....	70
4.8.4	Die technische Anwendbarkeit des Lotuseffektes .....	70
4.8.5	Der Lotuseffekt in der elektrischen Energietechnik .....	71
<b>5</b>	<b>Diagnose von Isolierwerkstoffen .....</b>	<b>72</b>
5.1.1	Definition Diagnose .....	72
5.1.2	Anwendungen der Diagnose .....	72
5.1.3	Diagnoseverfahren .....	72
5.2	Versuchstechnik zur Untersuchung von singulären Tropfen.....	75
5.2.1	Wahl einer geeigneten Versuchstechnik.....	75
5.2.2	Versuchsaufbau.....	76
5.2.3	Das Randwinkel-Meßsystem .....	77
5.2.4	Das Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem.....	80
5.2.5	Erzeugung und Messung der Hochspannung.....	82
<b>6</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen .....</b>	<b>85</b>
6.1	Parameter .....	85
6.2	Prüfkörper .....	89
6.3	Durchführung der Untersuchungen .....	93
6.4	Phänomene an singulären Tropfen im elektrischen Feld.....	96
6.4.1	Verdunstungsvorgänge .....	96
6.4.2	Strukturen auf der Tropfenoberfläche.....	98
6.4.3	Höhenänderungen des Tropfenscheitelpunktes .....	102
6.4.4	Bewegungen der Tripelpunkte.....	103
6.4.5	Flüssigkeitsspuren zwischen Tropfen.....	105
6.4.6	Vereinigung von Tropfen.....	106
6.4.7	Tropfenteilungen.....	107
6.4.8	Sprühtropfen .....	107

6.5	Oberflächenwellen-Einsetzspannung .....	109
6.5.1	Definition .....	109
6.5.2	Einflußgrößen .....	110
6.6	Kategorien zur Beschreibung einer Tropfenbewegung .....	114
6.6.1	Geometrische Kenngrößen .....	114
6.6.2	Tripelpunkt.....	116
6.6.3	Randwinkel .....	118
6.6.4	Tropfenhöhe.....	119
6.6.5	Definition des Tropfenverhaltens .....	120
6.6.6	Beispiele für typische Tropfenverhalten.....	121
<b>7</b>	<b>Simulationsrechnungen an singulären Tropfen.....</b>	<b>124</b>
7.1	Ziele der Simulationsrechnungen .....	124
7.2	Simulationsprogramm.....	124
7.3	Feld- und Kräfteberechnungen .....	128
<b>8</b>	<b>Erkenntnisse aus den durchgeführten Untersuchungen.....</b>	<b>131</b>
8.1	Tropfen im elektrischen Feld auf Isolierstoffoberflächen .....	131
8.2	Eine Erweiterung des Alterungsmodells .....	135
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>138</b>
	<b>Bildteil.....</b>	<b>143</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>159</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>177</b>
	<b>Bildverzeichnis .....</b>	<b>178</b>
	<b>Verzeichnis der Bildsequenzen .....</b>	<b>180</b>
	<b>Symbole und Abkürzungen.....</b>	<b>181</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>185</b>
<b>A</b>	<b>Versuchstechniken zur Alterung und Diagnose.....</b>	<b>187</b>
A 1	Inhalt des Anhangs.....	187
A 2	Prüfungen zur Bewertung von Isolierstoffsystemen.....	187
A 3	Alterung von Isolierwerkstoffen im Labor .....	190
A 3.1	Hintergrund zur Prüfung von Isolierwerkstoffen .....	190
A 3.2	Inverse Klimakammer.....	192
A 3.3	Kaltnebelkammer.....	194
A 3.4	Klimakammer .....	196
A 3.5	Modifizierter Radtest.....	197
A 3.6	Versuchstechnik zur Prüfung der Kriechstromfestigkeit.....	199
	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>203</b>



# 1 Einleitung

Die Hochspannung in den Anlagen und Netzen der elektrischen Energietechnik ist ein physikalisch unnatürlicher Zustand, da sich separierte gegenpolige elektrische Ladungen anziehen und bestrebt sind, die bestehende Potentialdifferenz auszugleichen. Eine Voraussetzung für die Aufrechterhaltung der Hochspannung in den Energiesystemen ist die Isolation zwischen dem Hochpotential und dem Erdpotential. Die Isolationsaufgaben können von gasförmigen, flüssigen und festen Stoffen erfüllt werden. Die Vielfalt der Isolierstoffe in der Elektrotechnik und deren Anwendbarkeit werden in [1] und [2] sehr umfassend und detailliert dargestellt und werden im folgenden ausschnittsweise für Anwendungen in der Hochspannungstechnik vorgestellt.

Ein wichtiges gasförmiges Isoliermedium ist die atmosphärische Luft. Durch ihre im Detail undefinierte Zusammensetzung können sich jedoch sehr unterschiedliche Eigenschaften ergeben, die von ihren Umgebungsbedingungen abhängig sind. Die elektrische Festigkeit von Luft wird durch die Durchschlagsfeldstärke von  $E_d = 32 \text{ kV/cm}$  [3] bei Normaldruck von  $p = 1013 \text{ hPa}$  und Normaltemperatur  $\vartheta = 20^\circ \text{ C}$  charakterisiert. Ein weiteres sehr häufig verwendetes Isoliergas in der Hochspannungstechnik ist Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ). Dieses synthetische Gas weist sehr gute elektrische und thermische Eigenschaften auf. Seine elektrische Festigkeit beträgt bei Normalbedingungen  $E_d = 89 \text{ kV/cm}$  [3]. In elektrischen Anlagen wird die elektrische Festigkeit von Schwefelhexafluorid zusätzlich verbessert, indem es unter erhöhtem Gasdruck als Isoliermedium eingesetzt wird. In [4] sind weitere Eigenschaften des Schwefelhexafluorids beschrieben.

Als flüssige Isolierstoffe werden in der Hochspannungstechnik vorwiegend natürliches Mineralöl mit  $E_d = 25 \text{ kV/mm}$  [3], aber auch in besonderen Fällen synthetisches Silikonöl mit  $E_d = 10 \text{ kV/mm}$  [3] verwendet.

Feste Isolierstoffe können im Gegensatz zu gasförmigen und flüssigen Isolierstoffen zusätzlich mechanische Aufgaben als tragende Elemente der Konstruktion erfüllen. Als feste Isolierstoffe werden sowohl anorganische als auch organische Materialien eingesetzt.



Die wichtigsten anorganischen Isolierstoffe in der Hochspannungstechnik sind Glas und keramische Werkstoffe, wie Porzellan und Oxidkeramik. Diese Materialien sind durch eine hohe elektrische Festigkeit mit Durchschlagsfeldstärken von  $E_d = 10$  bis  $50 \text{ kV/mm}$  bei Glas [3] und  $E_d = 20$  bis  $40 \text{ kV/mm}$  bei Porzellan [3] gekennzeichnet.

Organische Stoffe sind durch das enthaltene Element Kohlenstoff charakterisiert, das die Fähigkeit hat, lange Ketten oder ringförmige Strukturen im molekularen Bereich zu bilden. Künstliche organische Isolierstoffe, als Kunststoffe bezeichnet, haben in der Hochspannungstechnik eine große Bedeutung. Kunststoffe sind Polymerwerkstoffe, die sich durch Makromoleküle auszeichnen. Die Makromoleküle werden aus niedermolekularen Verbindungen durch die Verfahren Polymerisation, Polykondensation und Polyaddition synthetisch hergestellt. Die Grundelemente von Polymerwerkstoffen sind Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O), Stickstoff (N), Schwefel (S), Chlor (Cl), Fluor (F) und Silizium (Si) [5]. Die Kunststoffe werden aufgrund ihres Wärmeverhaltens in die drei großen Hauptgruppen Thermoplaste, Elastomere und Duromere unterteilt.

Thermoplaste bestehen aus Molekülketten, die nur durch schwache Van-der-Waals-Kräfte aneinander gebunden sind. Thermoplaste erweichen oberhalb ihrer Glas temperatur und erhärten bei Abkühlung wieder. Zu der Gruppe der Thermoplaste gehören u.a. Polyethylen (PE), vernetztes Polyethylen (VPE), Polyvinylchlorid (PVC), Polypropylen (PP) und Polytetrafluorethylen (PTFE).

Elastomere sind gummielastische verformbare Polymerwerkstoffe, die durch weitmaschige Vernetzung der Makromoleküle entstehen. Diese Werkstoffe sind formfest, aber elastisch verformbar. Sie schmelzen nicht, sind unlöslich, aber quellbar. Silikonelastomere entstehen durch Vulkanisation von Silikonkautschuk. Neben ihren mäßigen mechanischen Eigenschaften haben Silikonelastomere sehr gute elektrische Eigenschaften mit  $E_d = 20 \text{ kV/mm}$  [3] und finden daher vielseitige Anwendung in der Hochspannungstechnik. Ihre Eigenschaften werden u.a. in [6], [7] und [8] ausführlich untersucht.

Bei Duroplasten sind die Molekülketten durch kovalente Bindungen engmaschig vernetzt, so daß die Kettenbeweglichkeit im molekularen Bereich verloren geht. Sie sind unschmelzbar und nicht plastisch verformbar. Zu den Duroplasten gehören

Epoxidharz (EP) und Polyurethanharz (PUR). Epoxidharz-Formstoffe sind in der Hochspannungstechnik von großer Bedeutung und kommen für zahlreiche Isolationsaufgaben in Frage [9]. Es sind Mehrkomponentensysteme, die aus Harz, Härter, Beschleuniger, Flexibilisator, Füllstoff und Farbstoff bestehen. Durch unterschiedliche Zusammensetzungen können physikalische und chemische Eigenschaften variiert werden, die sich wiederum auf das elektrische Verhalten des Epoxidharzes auswirken. Epoxidharz-Formstoffe erreichen eine elektrische Festigkeit von  $E_d = 15 \text{ kV/mm}$  [3]. Dieser Wert hängt jedoch von der Geometrie und der Art der anliegenden Spannung ab und soll hier nur als ein Richtwert verstanden werden.

Die vorgestellten Isolierstoffe werden in den Betriebsmitteln der elektrischen Anlagen für zahlreiche Isolieraufgaben eingesetzt. Ein Betriebsmittel kann aus vielen unterschiedlichen Isolierkomponenten bestehen, die sich sowohl in ihrem Aggregatzustand als auch im Material unterscheiden. Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik sind Geräte, die Hochspannung ab einer Nennspannung von  $U = 1 \text{ kV}$  führen und der Energieerzeugung, Energieübertragung und Energieverteilung dienen. Durch ihre vielfältigen Aufgaben in den elektrischen Anlagen sind diese Geräte komplexe Systeme, die aus elektrischen und mechanischen Komponenten bestehen. Beispiele für Betriebsmittel sind Generatoren, Transformatoren, Schaltgeräte, Energiekabel und Überspannungsableiter. Eine Schaltanlage stellt eine Kombination aus mehreren Betriebsmitteln dar, wie Schaltgeräte, Transformatoren, Strom- und Spannungswandler, Energiekabel und Überspannungsableiter. In [10] werden Ausfallursachen für verschiedene Betriebsmittel und Schaltanlagentypen zusammengestellt. Es geht aus den Untersuchungen hervor, daß die Hauptursache von Ausfällen von Betriebsmitteln der Hochspannungstechnik auf dielektrische Fehler zurückzuführen ist.

Die Auswahl eines Isolierstoffes erfolgt nach den Gesichtspunkten der elektrischen Festigkeit, sowie den mechanischen und den thermischen Eigenschaften. Da das Isolationsmaterial über Jahrzehnte hinweg die Isolation zwischen Hochpotential und Erdpotential aufrechterhalten soll, ist das Langzeitverhalten des Isolierstoffes

maßgebend für einen sicheren und wartungsarmen Betrieb. Aus diesem Grund sind Alterungsvorgänge des Isolierstoffes von großer Bedeutung.

Bei festen Isolierstoffen kann die Alterung im Inneren des Isolierwerkstoffes und an der Oberfläche stattfinden. Es ist somit zwischen Volumen- und Oberflächenphänomenen zu unterscheiden. In beiden Fällen verursacht die Feuchtigkeit aus der Umgebung in Kombination mit einem anliegenden elektrischen Feld Materialveränderungen. In Abhängigkeit der Anwendung ist das elektrische Feld radial oder tangential bezüglich der Isolierstoffoberfläche gerichtet. Ein Beispiel für eine radiale Feldbelastung sind Energiekabel, die in ihrem Inneren das Hochpotential führen während die äußere Hüllfläche Erdpotential annimmt. Hier sind Volumeneffekte für das Alterungsverhalten von großer Bedeutung, die sich in Form von Entladungskanälen als Treeing [11] bemerkbar machen. Bei tangential beanspruchten Oberflächen, die z.B. an Hänge- oder Stützisolatoren vorkommen, sind Oberflächeneffekte für die Alterung entscheidend.

Ein Merkmal der Oberflächenalterung von polymeren Isolierwerkstoffen ist die Eigenschaft der Hydrophobie, d.h. die Fähigkeit, Wasser abstoßen zu können. Bei hydrophoben Oberflächen bilden sich in Anwesenheit von wässrigen Flüssigkeiten singuläre Tropfen aus, während bei hydrophilen Oberflächen flächige Beläge festzustellen sind.

Anorganische Werkstoffe, wie Glas und Porzellan, werden in der Energietechnik von organischen Polymerwerkstoffen, wie Epoxidharz-Formstoffe und Silikonelastomeren, zunehmend ersetzt, da organische Isolierstoffe entscheidende Vorteile bieten. Organische Feststoffe können, bedingt durch ihren Herstellungsprozeß, vielfältige geometrische Formen annehmen und bieten eine Gewichtsreduzierung der Isolierkörper im Vergleich zu anorganischen Isolierstoffen. Glas und Porzellan sind spröde Werkstoffe, bei denen eine lokale mechanische oder thermische Überbeanspruchung spontan ein Zerbersten des Isolierkörpers auslösen kann. Dadurch können weitere installierte Komponenten gefährdet und zerstört werden. Diese Nachteile werden durch die Verwendung organischer Werkstoffe ebenfalls vermieden.

Die anorganischen Isolierstoffe Glas und Porzellan haben gegenüber den organischen Isolierstoffen Vorteile durch ihr Langzeitverhalten. Diese anorganischen

Werkstoffe zeigen kaum ein Alterungsverhalten, sind jedoch durch ihre Oberflächeneigenschaften den hydrophilen Werkstoffen zuzuordnen. Dies bedeutet, es bilden sich flächige Flüssigkeitsbeläge auf der Isolierstoffoberfläche aus, die das Überschlagsverhalten nachteilig beeinflussen können.

Die Alterungseigenschaften der organischen Isolierwerkstoffe werden unter unterschiedlichen Gesichtspunkten untersucht, um die sonst maßgebenden Vorteile gegenüber den anorganischen Werkstoffen durch den Einsatz polymerer Werkstoffe nutzen zu können. Bei der Anwesenheit von Feuchte bilden organische Isolierstoffoberflächen im Neuzustand aufgrund ihrer Hydrophobieeigenschaft tropfenförmige Beläge, die durch Trockenzonen zwischen den sich singulär ausbildenden Tropfen gekennzeichnet sind [12]. Diese hydrophobe Charakteristik ist gegenüber den anorganischen Werkstoffen ein entscheidender Vorteil, kann sich aber während der Lebensdauer eines Betriebsmittels wesentlich verschlechtern und zu hydrophilem Charakter übergehen. Die Veränderung von hydrophoben zu hydrophilen Isolierstoffoberflächen ist ein Alterungsprozeß, der noch nicht vollständig erklärt und modelliert werden kann. Bei den bisher angewendeten experimentellen Methoden im Labor zur Beurteilung des Alterungsverhaltens eines Isolierstoffes wird die Fremdschicht als ein Einflußparameter für die Alterung gesehen, der als Ganzes auf die Oberfläche wirkt [13], [14], [15], [16], [17]. Es ist jedoch ungeklärt, wie sich einzelne Tropfen in der frühen Phase der Alterung im elektrischen Feld auf Isolierstoffoberflächen verhalten, bevor diese flächige Beläge bilden [12].

In dieser Arbeit werden stellvertretend für Polymerwerkstoffe am Beispiel von Epoxidharz-Formstoff Oberflächenprozesse geklärt, die an und zwischen singulären Tropfen stattfinden. Das elektrohydrodynamische Verhalten der Tropfen wird auf Isolierstoffoberflächen im Neuzustand bei einer zur Oberfläche parallelen elektrischen Beanspruchung analysiert, um die Umbildung von feuchten Schichten mit dazwischenliegenden Trockenzonen in flächige Feuchteschichten ohne Trockenzonen besser verstehen zu können.

## **2 Stand der Forschung**

### **2.1 Feuchte Fremdschichten auf Isolierstoffoberflächen**

#### **2.1.1 Innenraum- und Freiluftbedingungen**

In der elektrischen Energietechnik sind die Betriebsmittel während ihres Einsatzes im elektrischen Netz zahlreichen Umwelteinflüssen ausgesetzt. Abhängig von ihrem Aufstellungsort wird zwischen Anlagen der Freilufttechnik und der Innenraumtechnik unterschieden. Unter Freiluftbedingungen sind die elektrischen Anlagen unmittelbar dem atmosphärischen Klima ausgesetzt, das durch Niederschläge und Temperaturschwankungen gekennzeichnet ist. In der Innenraumtechnik hingegen sind die Betriebsmittel in einem Gebäude installiert, so daß sie durch die gebildete Schutzhülle des Bauwerks nur mittelbar durch die äußeren Klimabedingungen beeinflusst werden. Es entstehen somit drei verschiedene Klimabereiche, die unter Innenraumbedingungen zu berücksichtigen sind und in [18] definiert werden. Diese drei Bereiche, das Betriebsklima in Bereich 1, das Innenraumklima in Bereich 2 und das Freiluftklima in Bereich 3 werden in Bild 2.1 anhand einer installierten Innenraumschaltanlage verdeutlicht.

In Bereich 1 befinden sich die Komponenten der Schaltanlage, die durch ihre äußere Umhüllung in Form von Schaltanlagenwänden eine Abgrenzung zum angrenzenden Bereich bilden. Bereich 2 stellt den Innenraum des Gebäudes dar, in dem die Schaltanlage aufgestellt ist. In Bereich 3, der das Gebäude mit installierter Schaltanlage allseitig umgibt, herrscht das Freiluftklima mit unterschiedlichen Umwelteinflüssen.

Ein Vergleich zwischen Innenraumtechnik und Freilufttechnik verdeutlicht das Fehlen in der Freilufttechnik von Bereich 1 und Bereich 2 mit einer umgebenden Umhüllung in Form von Schaltanlagenwänden und einem Gebäude. Somit ist es offensichtlich, daß bei der Freilufttechnik durch Niederschläge oder Betauungsvorgänge Feuchtigkeit mit den Anlagenteilen in Kontakt kommt.

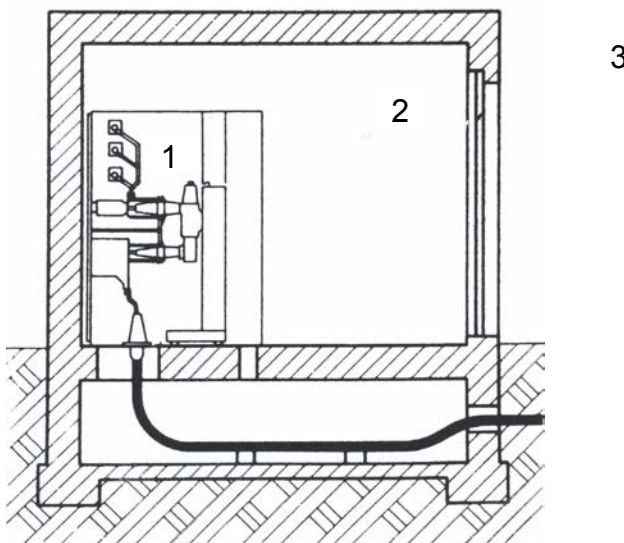


Bild 2.1: Klimabereiche bei installierten Innenraumanlagen [18]

Bereich 1: Innenraum der Schaltanlage

Bereich 2: Innenraum eines Gebäudes

Bereich 3: Freiluftklima

Bei Innenraumanwendungen kann die Anwesenheit von Feuchtigkeit trotz der zweifachen Umhüllung durch die Schaltanlagenwände und die Gebäudewandungen nicht ausgeschlossen werden. Die Feuchtigkeit der umgebenden Luft kann durch Öffnungen ins Innere der elektrischen Anlage gelangen. Eine weitere Möglichkeit zum Eindringen von Feuchte aus dem Freiluftklimabereich in das Anlageninnere besteht bei einem vorhandenen Kabelkanal. Durch Wassereintritt in den Kabelkanal kann Feuchte in das Innere der Schaltanlage gelangen, da in diesem Fall eine direkte Verbindung zwischen Bereich 3 und Bereich 1 besteht. Auch können über Druckentlastungskanäle, die zur Störlichtbogensicherheit eingesetzt werden, Luftmassen in das Innere der Schaltanlage oder zumindest in das Schaltanlagengebäude von außen gelangen.

Infolge eines Feuchtigkeitseintrittes in luftisolierten Schaltanlagen (AIS = Air Insulated Switchgear), hervorgerufen durch hohe Luftfeuchte oder direktes Wasser, entsteht im Inneren der Anlage ein lokales Betriebsklima. Dabei sind Temperaturschwankungen von besonderer Bedeutung. Bei einer Abkühlung der Lufttemperatur in Klimabereich 3 befindet sich im Inneren der Schaltanlage bedingt durch die Zeitkonstanten der Wärmeübertragung noch warme feuchte Luft, die zuvor auch in Bereich 3 vorhanden war. Durch eine Temperaturdifferenz zwischen der Luft

im Anlageninneren und der bereits abgekühlten Schaltanlagenwand entsteht eine Taupunktunterschreitung auf der Innenseite der Anlagenwand. Dies führt zu einem Betauungsvorgang, bei dem sich Tropfen bilden, die auf Anlagenteile herabtropfen können. Bei einer Erhöhung der Temperatur in Bereich 3 können Isolierwerkstoffe in Bereich 1 aufgrund ihrer Wärmekapazität nur verzögert die Außentemperatur annehmen. Trifft die wärmere Luft auf ein noch kaltes Anlagenteil, so kommt es ebenfalls zu einer Taupunktunterschreitung mit einsetzender Kondensation auf den noch kalten Oberflächen.

Ein Spezialfall im Hinblick auf den Feuchtigkeitseinfluß in der Schaltanlagentechnik sind gasisolierte Schaltanlagen (GIS = Gas Insulated Switchgear), die durch ihre hermetisch dichte Kapselung völlig von der Umgebung getrennt sind. Sie werden sowohl in der Freilufttechnik als auch in der Innenraumtechnik eingesetzt. Als Isoliergas werden Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) oder Gasmischungen mit  $\text{SF}_6$ -Anteil verwendet, das unter Druck zwischen  $1,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  und  $5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  [3] in den Schaltanlagen betrieben wird. Bei gasisolierten Schaltanlagen kann keine Feuchte aus der äußeren Umgebung eindringen, wenn die Anlage hermetisch abgeschlossene ist. Feuchte im Gasraum kann jedoch durch Austritt von Feuchte aus dem Inneren von festen Isolierstellen innerhalb der Schaltanlage auftreten. Weiterhin besteht die Möglichkeit der Bildung von Flüssigkeit durch Verflüssigung des Isoliergases bei niedrigen Temperaturen.

Bei luftisolierten Innenraumschaltanlagen ist für die Beanspruchung der Isolierstoffoberflächen der Schaltanlagenkomponenten nur das Betriebsklima in Bereich 1 maßgebend. Die Bereiche 2 und 3 beeinflussen wiederum den Bereich 1, wobei der Übergangsbereich 2 als Zeitverzögerungsglied zwischen dem Bereich 1 und Bereich 2 gesehen werden kann. Die atmosphärische Umgebung des Bereiches 3 ist für den Betrieb der elektrischen Anlage nicht einflußbar. Dieser wird von dem Klima und weiteren Umweltfaktoren bestimmt, wie Salznebel in Küstengebieten, hohe Feuchtigkeit in Tropengebieten oder Verschmutzungen in Industriegebieten. Der Bereich 2 kann vom Betreiber der Anlage in gewissen Grenzen gestaltet werden. Hier können beispielsweise Heizungen zur Vermeidung von starken Temperaturschwankungen oder Staubfilter zur Reduzierung von Partikeln installiert werden. In tropischen Regionen werden Klimaanlage eingesetzt, um auf die

Luftfeuchte in Bereich 1 einen Einfluß zu nehmen. Falls diese Maßnahmen einen zuverlässigen Betrieb der luftisolierten Schaltanlage nicht gewährleisten können, werden bevorzugt gasisolierte Schaltanlagen eingesetzt. Durch Temperaturschwankungen können jedoch infolge vorhandener Restfeuchte im Inneren der Anlage ebenfalls Kondensationsvorgänge eintreten. Daher werden bei Betriebsbedingungen unter extrem niedrigen Temperaturen bei gasisolierten Schaltanlagen Heizelemente im Gasraum eingebaut, um eine Verflüssigung des Isoliergases und somit eine Kondensation von  $\text{SF}_6$  zu vermeiden.

### 2.1.2 Vergleich der Schaltanlagentypen in der Mittelspannungstechnik

Beim Vergleich der Techniken von luftisolierten Innenraumschaltanlagen, luftisolierten Freiluftschaltanlagen und gasisolierten Schaltanlagen im Mittelspannungsbereich, d.h. mit einer Nennspannung von  $U_m = 1 \text{ kV}$  bis  $U_m = 52 \text{ kV}$ , spiegeln sich die unterschiedlichen Beanspruchungen durch den Klimaeinfluß wieder. In Tabelle 2.1 werden die Besonderheiten der drei genannten Anlagentypen miteinander verglichen [12].

Die Betriebsmittel für Innenraum- und Freiluftanwendungen werden aufgrund ihrer unterschiedlichen atmosphärischen Klimaeinflüsse unter verschiedenen Gesichtspunkten konstruiert und elektrisch ausgelegt, da für Innenraumanlagen geringere Einflüsse durch Feuchte und leitende Partikel vorausgesetzt werden als bei Freiluftanlagen. Dieses hat Auswirkungen auf die geometrischen Abmessungen und wird im Kriechweg der Isolierstrecke berücksichtigt. Der Kriechweg ist definitionsgemäß die kürzeste geometrische Strecke entlang der Isolierstoffoberfläche vom Hochpotential zum Erdpotential. In der Freilufttechnik erfolgt die Bemessungen der Kriechweglängen in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen nach Fremdschichtklassen (FK) [19]. Der Kriechweg wird für Freiluftbedingungen am längsten bemessen, da die Umgebungsbeeinflussungen, z.B. Niederschläge, leitende Partikel und Umweltverschmutzungen, einzeln oder in Kombination sehr hoch sein können. In der Innenraumtechnik und bei gasisolierten Anlagen hingegen wird aufgrund eines geringeren Umgebungseinflusses der Kriechweg kürzer ausgelegt, was eine höhere elektrische Beanspruchung des Isoliermaterials bei gleicher anliegender Spannungshöhe zur Folge hat.



Tabelle 2.1: Merkmale der verschiedenen Schaltanlagentypen in der Mittelspannungstechnik [12]

	<b>gasisolierte Anlagen</b>	<b>luftisolierte Innenraum-Anlagen</b>	<b>luftisolierte Freiluft-Anlagen</b>
<b>Elektrische Beanspruchung</b>	sehr hoch	hoch	gering
<b>Spezifischer Kriechweg in cm/kV bezogen auf <math>U_m</math></b>	sehr gering < 0,5	gering < 2	groß > 2,8 (FK 1) > 5,4 (FK 4) FK=Fremdschicht- klassen nach IEC 60815 [19]
<b>Umgebungseinfluß</b>	gering	unterschiedlich	sehr hoch
<b>Belastung durch</b>	Temperatur, Kondensation, SF <sub>6</sub> - Spaltprodukte	Temperatur, Kondensation, Ozon, Säure, natürliche und industrielle Fremdschichten	Temperatur, Feuchte, Regen, Nebel, Schnee, Eis natürliche und industrielle Fremdschichten
<b>Selbstreinigungseffekt</b>	nein	nein	ja
<b>Selbstverschmutzung</b>	möglich	möglich, je nach Umgebungs- bedingungen wahrscheinlich	möglich, aber unwesentlich

Bei Anwesenheit von Feuchte und Fremdstoffen bilden sich auf den Oberflächen der Anlagenkomponenten Fremdschichten aus. Nach IEC 60507 [20] ist eine Fremdschicht eine elektrolytisch leitende Schicht auf einer Isolierstoffoberfläche, die aus wasserbindenden, nichtleitenden Partikeln, Salzen und Wasser besteht. Die Schichtleitfähigkeit charakterisiert die Eigenschaften einer Fremdschicht. Sie ist definiert als Produkt der Volumenleitfähigkeit und der Schichtdicke. Dies bedeutet, daß sowohl durch die Änderung des Verschmutzungsgrades als auch durch die Änderung der Wassermenge die Schichtleitfähigkeit variiert werden kann. Im elektrischen Betrieb der Anlagen können die Fremdschichten wesentlich zu einer Verschlechterung des Isoliervermögens beitragen.

In der Freilufttechnik kommt es durch abfließende Feuchtebeläge, die durch Umgebungseinflüsse und Niederschläge hervorgerufen werden können, zu einem Selbstreinigungseffekt der Oberflächen, der bei der Innenraumtechnik und bei

gasisolierten Anlagen weitgehend ausbleibt. Als Folge einer fehlenden Selbstreinigung können auf der Isolierstoffoberfläche Fremdstoffe zurückbleiben, die mit der Oberfläche des Feststoffes reagieren und somit eine Selbstverschmutzung einleiten.

### 2.1.3 Innenraumanlagen unter erschwerten Umgebungsbedingungen

Bei Innenraumanlagen werden weniger Fremdschichten mit einer zeitlich kürzeren Anwesenheit und damit einer kürzeren Einwirkungszeit als bei Freiluftanlagen erwartet. Aus diesem Grund sind die zulässigen elektrischen Feldstärken im Innenraumbereich sehr hoch bemessen. Kommt es dennoch zur Bildung einer Fremdschicht, ist dieser Fall besonders kritisch. Aufgrund dieser Tatsache und zur Sicherstellung eines zuverlässigen Betriebs einer Anlage wurde von der Internationalen Working Group WG 10 des IEC SC 17 C im Jahre 1981 ein Prüfverfahren vorgeschlagen, das erschwerte Betriebsbedingungen für Innenraumanlagen berücksichtigt. Das Verfahren, das die Kondensation im Inneren von luftisolierten Schaltanlagen der Innenraumtechnik im Labor nachbildet, wird in [21] vorgestellt und in zahlreichen Untersuchungen [22], [23], [24], [25], [26], [27] angewendet.

Es werden für Innenraumschaltanlagen in [21] Bemessungsklassen definiert, die den Aufstellungsort und die dort herrschenden erschwerten Umgebungsbedingungen berücksichtigen. Zur Beurteilung der Betriebsbedingungen hinsichtlich Betauung und Fremdschicht werden Kategorien herangezogen, die in Tabelle 2.2 dargestellt sind.

Tabelle 2.2: Kategorien für Betauung und Fremdschichten [28]

	Parameter	Betriebsbedingung
<b>Betauung</b>	$C_O$	normalerweise keine Betauung
	$C_L$	nicht häufig vorkommende Betauung
	$C_H$	häufig vorkommende Betauung
<b>Fremdschicht</b>	$P_O$	keine Fremdschicht
	$P_L$	leichte Fremdschicht
	$P_H$	starke Fremdschicht

Die Kombination eines Betauungsparameters ( $C = \text{Condensation}$ ) mit einem Fremdschichtparameter ( $P = \text{Pollution}$ ) wird als eine reale Betriebsbedingung angesehen, da das Zusammenwirken von Feuchtigkeit und Fremdschicht die Anlage besonders stark beeinflusst. Allerdings wird die Kategorie  $P_O$  ausgeschlossen, da diese als unrealistisch betrachtet wird. Die übrigen Parameter ergeben in ihren entsprechenden Kombinationen drei Schwierigkeitsgrade für die Betriebsbedingungen einer Anlage.

Tabelle 2.3: Definition der Schwierigkeitsgrade [28]

Schwierigkeitsgrad	Kombination der Betauungs- und Fremdschichtparameter
Schwierigkeitsgrad 0	$C_O P_L$
Schwierigkeitsgrad 1	$C_L P_L$ oder $C_O P_H$
Schwierigkeitsgrad 2	$C_L P_H$ oder $C_H P_L$ oder $C_H P_H$

Entsprechend dieser drei Schwierigkeitsgrade für die Betriebsbedingungen werden für luftisolierte Schaltanlagen drei Bemessungsklassen definiert, die in Tabelle 2.4 dargestellt sind.

Tabelle 2.4: Definition der Bemessungsklassen [28]

Bemessungsklasse	Anlagenkategorisierung
Bemessungsklasse 0	Anlagen, die dem Schwierigkeitsgrad 0 widerstehen
Bemessungsklasse 1	Anlagen, die dem Schwierigkeitsgrad 1 widerstehen
Bemessungsklasse 2	Anlagen, die dem Schwierigkeitsgrad 2 widerstehen

Schaltanlagen, die unter normalen Betriebsbedingungen gemäß IEC 60298 [29] oder IEC 60466 [30] eingesetzt und nach diesen Vorschriften ausgelegt wurden, benötigen keine zusätzliche Prüfung und gehören der Bemessungsklasse 0 an. Ein zufriedenstellendes Verhalten einer Anlage der Bemessungsklassen 1 und 2 unter erschwerten Betriebsbedingungen wird durch eine entsprechende Prüfung im Labor nachgewiesen, bevor die Anlage den erschwerten Umgebungsbedingungen im realen Betrieb ausgesetzt wird. Für die Klassifizierung einer Schaltanlage gibt es verschiedene Möglichkeiten, die in Bild 2.2 [28] in Form eines Flußdiagramms

dargestellt sind. Ausgangspunkt für eine Betriebsmittelprüfung nach IEC Report 932 ist die Bemessungsklasse 0, d.h. die zu prüfende Anlage ist bereits nach IEC 60298 [29] oder IEC 60466 [30] typgeprüft und soll unter erschwerten Umgebungsbedingungen zum Einsatz kommen.

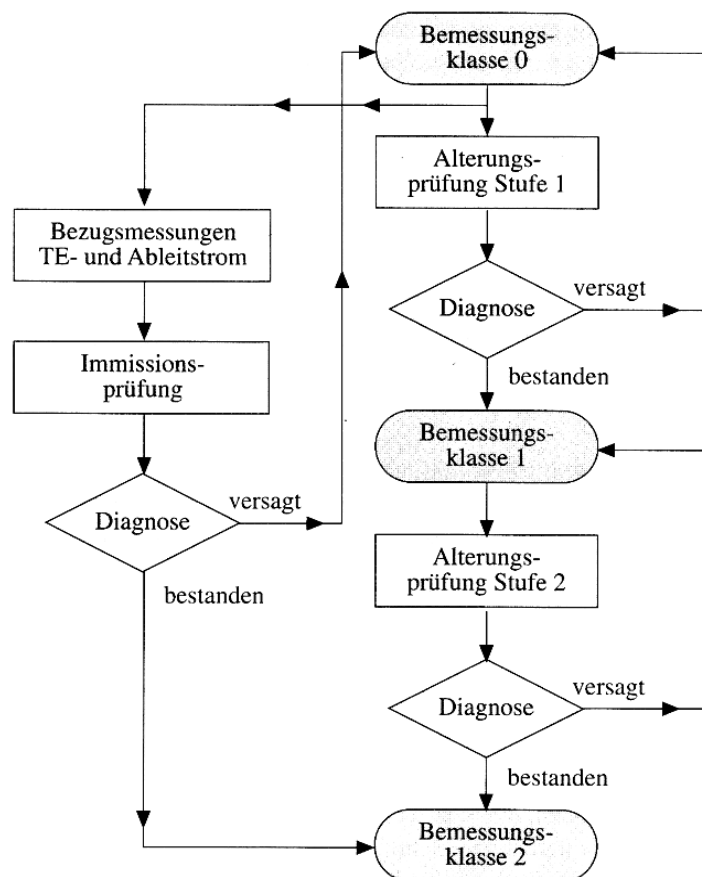


Bild 2.2: Möglichkeiten zur Klassifizierung einer Innenraumschaltanlage [28]

Eine Prüfung, die bei erfolgreichem Ergebnis direkt zur Bemessungsklasse 2 führt, ist die Immissionsprüfung des IEC Reports 932. Diese Prüfung hat das Ziel, die Wirksamkeit der Kapselung gegen das Eindringen von Fremdschichten und Feuchtigkeit zu prüfen. Es wird dabei davon ausgegangen, daß die äußere Kapselung der Anlage eine Schutzwirkung aufweist, durch die Alterungserscheinungen erheblich reduziert werden. Bei der Immissionsprüfung wird das Eindringen klimatischer Feuchte untersucht und eine Diagnose der Anlage unter solchen erschwerten Bedingungen durchgeführt.

Eine weitere Möglichkeit zur Klassifizierung einer Anlage sind die Alterungsprüfungen der Stufe 1 und der Stufe 2. Die Alterungsprüfung der Stufe 1 führt bei Bestehen zur Bemessungsklasse 1 und entsprechend die der Stufe 2 zur Bemessungsklasse 2. Das Ziel der Alterungsprüfungen des IEC Reportes 932 ist der Nachweis einer Betriebssicherheit des Prüfobjektes unter den Anforderungen des entsprechenden Schwierigkeitsgrades 1 oder 2. Bei den Alterungsprüfungen der Stufe 1 und Stufe 2 wird das Prüfobjekt Temperatur- und Feuchtezyklen ausgesetzt, deren zeitlicher Verlauf für beide Stufen identisch ist, die sich aber in ihrer Anzahl unterscheiden.

Der IEC Report 932 schlägt somit Prüfverfahren vor, die eine Beurteilung des Langzeitverhaltens einer komplexen elektrischen Anlage zulassen. Unter Berücksichtigung des Feuchte- und Temperatureinflusses werden im Labor reale Betriebsbedingungen nachgebildet und eine beschleunigte Alterung des Isoliermaterials eingeleitet, die für die Zuverlässigkeit der elektrischen Anlage entscheidend sein kann.

#### **2.1.4 Der Begriff Alterung**

Alterung ist ein Prozeß irreversibler Veränderungen. In [31] wird Materialalterung als die Gesamtheit aller im Laufe der Zeit an einem Material irreversiblen ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge definiert. Übertragen auf die Alterung von Isolierstoffsystemen bedeutet dies eine irreversible Schädigung der Feststoffoberfläche, die durch die Veränderung der Benetzungseigenschaften charakterisiert werden kann. Für die Ursache der Alterung können sowohl innere als auch äußere Einflüsse verantwortlich sein. Äußere Einflußfaktoren sind u.a. Ablagerungen, die chemisch mit der Isolierstoffoberfläche reagieren, oder Strahlung, die den Molekülaufbau an der Materialoberfläche zerstört. Innere Veränderungen können z.B. durch Diffusionsvorgänge eingeleitet werden.

Zur Beschreibung von Alterungsphänomenen werden Modelle u.a. von [32], [33] und [34] vorgeschlagen. Dabei werden Modellierungen von Überschlagsmechanismen und Bedingungen zum Lichtbogenlöschverhalten vorgestellt, die sich vorwiegend auf die Phänomene in der Freilufttechnik beziehen. Der Fremdschichtüberschlag, beschrieben in [32], ist typisch für

Freiluftanwendungen. Im folgenden wird das in [35] entwickelte Alterungsmodell für Innenraumbedingungen vorgestellt. In diesem Modell werden zwei Alterungsbereiche, die „Alterungsfrühphase“ und die „Alterungsspätphase“ definiert. Unter Innenraumbedingungen werden sowohl Alterungsfrüh- als auch Alterungsspätphase durchlaufen, während für Freiluftanwendungen die Alterungsspätphase charakteristisch ist.

### **2.1.5 Oberflächenalterung unter Innenraumbedingungen**

Oberflächen fester Isolierstoffe in luftisolierten Innenraumanlagen sind Temperatur- und Feuchteschwankungen unterworfen, die zu Kondensation führen können. Diese Anlagen sind im Vergleich zu Freiluftbetriebsmitteln geringen atmosphärischen Fremdschichtablagerungen ausgesetzt. Im ungealterten Zustand der Isolierstoffoberfläche bilden sich Feuchtebeläge in Form von singulären Tropfen mit dazwischenliegenden Trockenzonen aus. Die Alterungsfrühphase beginnt mit dem Einsetzen von Mikroentladungen. Diese entstehen bei elektrischer Beanspruchung infolge inhomogener Feldverteilung. Durch die Anwesenheit von Tropfen treten an Tropfenrändern erhöhte Feldstärken auf, so daß dort Mikroentladungen auftreten. Mikroentladungen können auch auf geneigten Oberflächen durch ablaufende Tropfen entstehen, die sich durch einen Abrollvorgang von Feuchtebereichen entfernen. Diese Mikroentladungen werden daher auch Abrißentladungen genannt. Die auf verschiedene Weisen entstandenen Mikroentladungen sind energieschwache Teilentladungen und ionisieren die umgebende Luft, so daß dies wiederum zu einer Bildung von Ozon ( $O_3$ ) und Stickoxiden ( $NO_x$ ) führt. Durch die Anwesenheit von Wasser bilden sich auf der Isolierstoffoberfläche Säuren und Laugen, wobei die Entstehung von Salpetersäure ( $HNO_3$ ) einen entscheidenden Einfluß auf das Alterungsverhalten hat. Nach der Bildung von Salpetersäure setzen zwei zeitgleich parallel ablaufende Prozesse ein, zum einen eine Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit der Isolierstoffes, zum anderen eine Veränderung der Feuchteschicht.

Die Isolierstoffoberfläche wird durch die vorhandene Salpetersäure chemisch angegriffen. Dies hat eine Flächenerosion zur Folge. Zusätzlich bewirken die Mikroentladungen eine Zerstörung der oberen Feststoffschicht, was eine Zerstörung

der silikonhaltigen Trennmittelschicht bewirkt. Eine Folge dieser elektrochemischen Flächenerosion ist die Zunahme der Oberflächenspannung des Isolierstoffes und führt zu einem Hydrophobieverlust an der Feststoffoberfläche. Daraus resultiert wiederum eine erhöhte Anlagerung von Feuchte auf der Isolierstoffoberfläche, was durch die Schichtdicke der Feuchteschicht beschrieben werden kann.

Durch die Anwesenheit von Salpetersäure wird ein zweiter parallel ablaufender Prozeß in der Feuchteschicht initiiert. Es entstehen lösliche Nitrate, die infolge von Dissoziation für die Zunahme der Volumenleitfähigkeit der Fremdschicht verantwortlich sind.

Die beiden parallel ablaufenden Prozesse, die Oberflächenveränderung und die chemische Umwandlung der Fremdschicht, werden in [35] mit dem Begriff „elektrolytische Teilentladungserosion“ zusammengefaßt. Das Ergebnis dieser beiden Prozesse ist eine Erhöhung der Schichtleitfähigkeit, die sich bei einer zusammenhängenden Schicht aus dem Produkt ihrer Volumenleitfähigkeit und der Schichtdicke berechnet.

Bei einer Zunahme der Schichtleitfähigkeit steigt der Ableitstrom in der Fremdschicht auf der Isolierstoffoberfläche zwischen Hochspannungselektrode und Erdelektrode an. Da die Feuchtigkeit nicht gleichmäßig auf der Oberfläche verteilt ist, kommt es durch den Ableitstrom zu lokalen thermischen Aufheizungen der Feuchteschicht und der darunterliegenden Isolierstoffoberfläche. Durch die Erwärmung bilden sich hochohmige Trockenzonen aus. Die Entstehung von Trockenzonen deutet auf den Übergang zwischen Alterungsfrüh- und Alterungsspätphase hin. In den Untersuchungen in [35] wird an stabförmigen Epoxidharz-Prüfkörpern eine umgesetzte Verlustleistung von etwa  $5 \text{ mW/cm}^2$  für die partielle Austrocknung der Fremdschicht festgestellt. In Bild 2.3 ist der Ablauf der Alterungsfrühphase anhand der Modellvorstellung nach [35] zusammenfassend dargestellt.

In der Alterungsspätphase werden die entstandenen Trockenzonen durch Teillichtbögen überbrückt. Dieser Vorgang wird auch als „Szintillation“ bezeichnet. Der Begriff „Szintillation“ kennzeichnet die Form von elektrischen Entladungen über thermischen Trockenzonen. Szintillationen sind Teillichtbögen als Folgeerscheinung thermischer Prozesse auf der Isolierstoffoberfläche, wobei

der Ableitstrom weiter aufrechterhalten wird. Diese elektrischen Entladungen können die polymeren Isolierwerkstoffe irreversibel verändern. Hierbei ist die zeitliche und örtliche Verteilung der Szintillationen entscheidend.

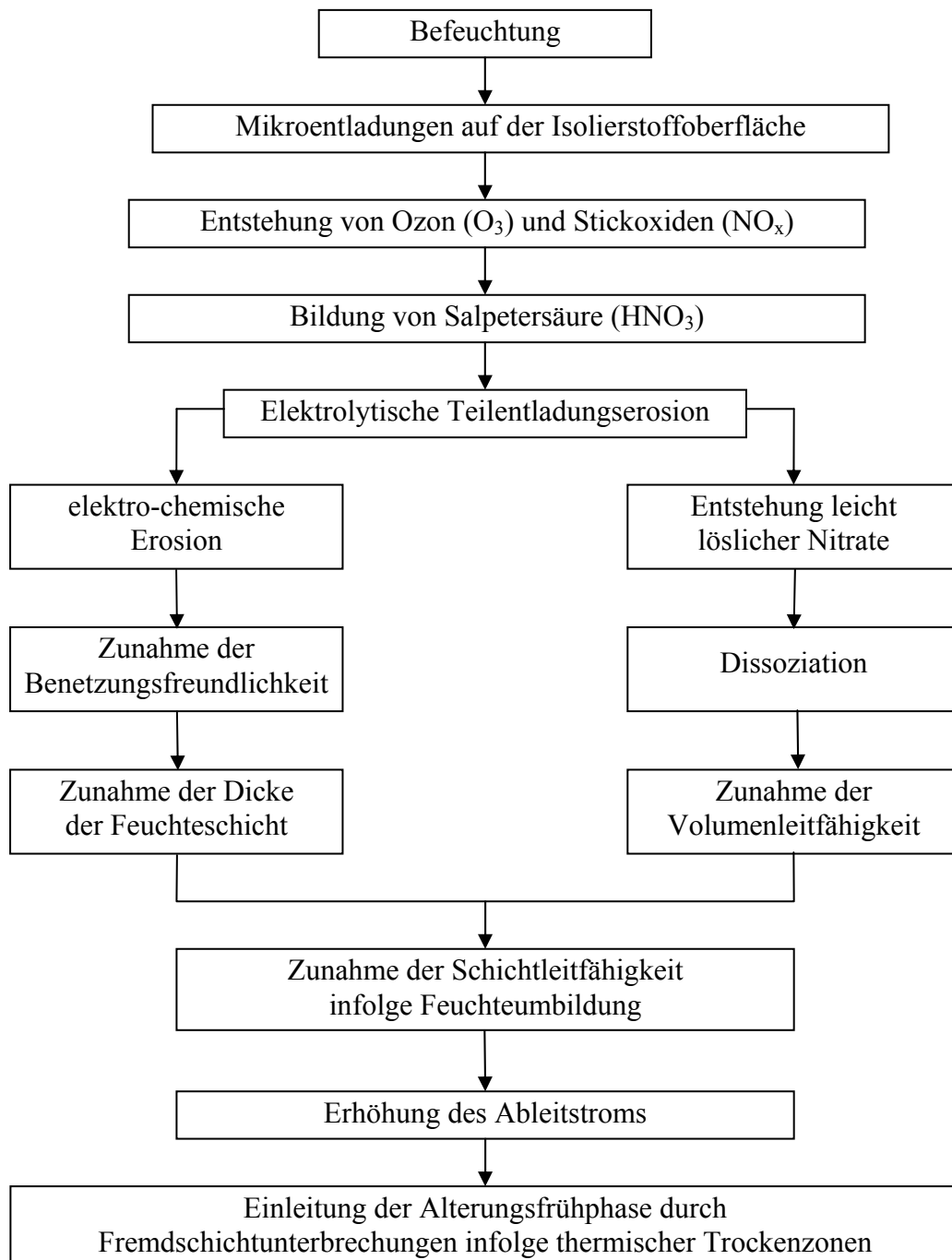


Bild 2.3: Alterungsmodell zur Beschreibung der Alterungsfrühphase [35]



Bei hohen Strömen kann es örtlich zu Glühzonen mit Temperaturen über 800° C kommen, in denen abhängig von der Kriechstromfestigkeit des Werkstoffes flächige oder grabende Erosionsprozesse in den Fußpunkten der Teillichtbogen einsetzen und die Isolierstoffoberfläche zerstören [35].

Die stromstarken Oberflächenentladungen führen zu lokalen Aufheizungen der Isolierstoffoberfläche und somit auch zu einer Materialzersetzung aufgrund der hohen Temperaturen der Lichtbogenfußpunkte. Die vorwiegend thermische Zerstörung der Isolierstoffoberfläche hat tiefgrabende Erosion und Kriechspurbildung zur Folge. Im ungünstigsten Fall kommt es zu einer vollständigen Überbrückung der gesamten Isolierstrecke durch eine leitfähige Kriechspur von der Hochspannungs- zur Erdelektrode oder durch einen Fremdschichtüberschlag.

#### **2.1.6 Oberflächenalterung unter Freiluftbedingungen**

Unter Freiluftbedingungen können aufgrund erhöhter klimatischer Beanspruchungen intensivere Befeuchtungen und stärkere Verschmutzungen im Vergleich zu Innenraumbedingungen auftreten. Durch eine hohe Schichtleitfähigkeit zu Beginn der Fremdschichtbildung können die Bedingungen für das Entstehen von Szintillationen gegeben sein. Die Alterungsfrühphase kann unter Freiluftbedingungen infolge von Szintillationen zeitlich sehr kurz verlaufen oder wird sogar übersprungen. Es setzen unmittelbar die Mechanismen der Alterungsspätphase ein, die mit der Bildung von hochohmigen Trockenzonen und überbrückenden stromstarken Teillichtbögen die Isolierstoffoberfläche irreversibel verändern. Das Überschlagsverhalten ist u.a. von der Umgebungstemperatur und der Luftfeuchte abhängig [36].

Die Oberflächenalterung unter Freiluftbedingungen kann für die meisten Werkstoffe der Alterungsspätphase zugeordnet werden. Eine Ausnahme davon können Silikonelastomere bilden, die aufgrund ihrer stark hydrophoben Eigenschaften auch unter erschwerten Freiluftbedingungen tropfenförmige Fremdschichten bilden und somit einen Anstieg des Ableitstromes über lange Zeit verhindern können. Sie durchlaufen ebenso eine Alterungsfrühphase wie sie für Innenraumbedingungen charakteristisch ist [37].

## 2.2 Flüssigkeiten im elektrischen Feld – Tropfeninstabilitäten

Flüssigkeitstropfen, die einem elektrischen Gleich- oder Wechselfeld ausgesetzt sind, können verschiedene Erscheinungsformen einer Instabilität zeigen. In [38] und [39] werden folgende Phänomene unter dem Begriff Instabilität zusammengefaßt:

- Ausbildung konischer Spitzen an den Polen des Tropfens
- Herauswachsen dünner Wasserfäden aus den Spitzen deformierter Tropfen
- Auflösung der Wasserfäden in winzige Sprühtropfen

Grundlegende Untersuchungen und theoretische Betrachtungen werden in [38] und [39] an freien Tropfen durchgeführt. Der Forschungsschwerpunkt stammt aus der Gewitterforschung, bei der Tropfen durch elektrische Ladungsmechanismen in Wolken miteinander reagieren.

Freie Tropfen liegen nicht auf einer Oberfläche, sondern sind von einem gasförmigen Medium umgeben und werden fallend in einem elektrischen Feld untersucht. Die folgenden Betrachtungen stammen aus diesen Untersuchungen, können aber näherungsweise auch für liegende Tropfen auf festen Oberflächen herangezogen werden.

Die elektrohydrodynamische Instabilität eines ungeladenen Tropfens im elektrischen Feld wird durch eine kritische Feldstärke  $E_{kr}$  beschrieben [40].

$$E_{kr} = \sqrt{\frac{\gamma}{\epsilon_0 \cdot r}} \cdot c \quad (2.1)$$

Dabei ist die kritische Feldstärke  $E_{kr}$  von dem Radius  $r$  des Tropfens, der Oberflächenspannung  $\gamma$  und einer Konstanten  $c$  abhängig. Die Konstante  $c$  wurde sowohl theoretisch als auch experimentell ermittelt und beträgt 0,453 nach [41]. Aus der Gleichung 2.1 ist zu schließen, daß ein Tropfen im elektrischen Feld um so stabiler ist, je kleiner der Tropfenradius  $r$  ist, d.h. je größer der Krümmungsdruck ist [8].

Ein geladener Tropfen kann auch ohne ein äußeres elektrisches Feld eine Instabilität aufweisen. Hierzu ist die Rayleigh Ladung  $Q_R$  maßgebend [42].

$$Q_R = 8 \cdot \pi \cdot \sqrt{\gamma \cdot \epsilon_0 \cdot r^3} \quad (2.2)$$

Befindet sich ein geladener Tropfen in einem äußeren Feldeinfluß, so vermindert sich die kritische Feldstärke nahezu linear mit der Ladung  $Q$  des Tropfens nach folgender Formel [43]:

$$E_{\text{geladen}} \approx E_{\text{kr}} \cdot \left(1 - \frac{Q}{Q_R}\right) \quad (2.3)$$

Somit errechnet sich die kritische Feldstärke für einen geladenen Tropfen nach

$$E_{\text{kr\_geladen}} \approx 0,453 \cdot \left(1 - \frac{Q}{Q_R}\right) \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\epsilon_0 \cdot r}} \quad (2.4)$$

Liegende Tropfen im elektrischen Feld verformen sich mit einer zuvor kreisförmigen Grundfläche zu Tropfen mit elliptischen Grundflächen. Bei dieser stabilen Verformung nimmt die große Halbachse der Ellipse die Richtung der Feldlinien des äußeren angelegten Feldes an. Nach [38] tritt eine Instabilität nach vorheriger Verformung in eine elliptische Grundfläche ein, wenn sich der Tropfen soweit verformt hat, daß die Haupt- und Nebenachse der Ellipse ein Verhältnis von 1,9 aufweist. Experimentelle Untersuchungen zeigen einen Winkel am Ellipsenscheitelpunkt der Hauptachse von etwa  $90^\circ$ , bevor der Tropfen seine elliptische Grundfläche verliert. In theoretischen und experimentellen Untersuchungen wurde die Angabe des Winkels auf  $98,6^\circ$  präzisiert und nach seinem Entdecker Taylor-Winkel genannt [38]. Dieser Winkel beschreibt den letzten Zustand eines Tropfens, bevor dieser instabil wird.

Bei benachbarten Tropfen wird die kritische Feldstärke mit abnehmendem Abstand zwischen den Tropfen reduziert [41]. Bei einem Verhältnis von Abstand zu Tropfenradius von 1,2 bis 2,0 können sich benachbarte Tropfen gleicher Größe infolge einer Deformation berühren, bevor sie instabil werden [41].

## 2.3 Wassertropfen auf Isolierstoffoberflächen im elektrischen Feld

### 2.3.1 Tropfenbeläge, Fremdschichten und singuläre Tropfen

Das elektrohydrodynamische Verhalten von Wassertropfen auf Isolierstoffoberflächen wird herangezogen, um das elektrische Verhalten von realen Isolierkomponenten besser verstehen und erklären zu können. Im folgenden ist zwischen Tropfenbelägen, Fremdschichten und singulären Tropfen zu unterscheiden.

Tropfenbeläge sind zufällig verteilte Tropfen unterschiedlicher Größe, wie sie auf realen Oberflächen durch fallenden Niederschlag, Kondensation oder Sprühvorgänge [44] entstehen. Zwischen den einzelnen Tropfen existieren trockene Zonen, so daß jeder Tropfen als solcher zu erkennen ist. Fremdschichten hingegen sind wässrige flächige Beläge, die durch das Zusammenfließen von Tropfenbelägen entstanden sind. Bei Fremdschichten können bereits chemische Reaktionen stattgefunden haben, so daß sich diese in ihrer ursprünglichen Zusammensetzung verändert und eine erhöhte Leitfähigkeit gebildet haben. Unter singulären Tropfen werden im folgenden einzelne Tropfen mit definiertem Volumen und definierter Volumenleitfähigkeit verstanden, die gezielt auf der Isolierstoffoberfläche plaziert werden.

### 2.3.2 Überschlagsmechanismen

In [45] wird das Verhalten von singulären Tropfen und Tropfenbelägen zur Untersuchung von Überschlagsmechanismen auf Isolierstoffoberflächen analysiert. Bei Experimenten mit singulären Tropfen in einem hohen Gleichfeld wird die Überschlagsspannung mit der Instabilität eines Tropfens in Verbindung gebracht. Das Kriterium nach [38] für eine Tropfeninstabilität, bei der sich ein Tropfen in Feldrichtung verformt, kann in [45] für hydrophobe Oberflächen bestätigt werden. Bei einem anliegenden parallelen elektrischen Gleichfeld zur Isolierstoffoberfläche werden an Tropfen Hystereseerscheinungen der beiden im zweidimensionalen Schnitt dargestellten Randwinkel  $\Theta$  beobachtet. Die Verformungen eines singulären Tropfens, entnommen aus [45], sind schematisch in Bild 2.4 dargestellt. Bei konstanter Kontaktfläche zwischen Isolierstoffoberfläche und Tropfen vergrößert sich zunächst der Randwinkel, indem sich der obere Bereich des Tropfens horizontal verbreitert. Nach Erreichen des maximalen Randwinkels beginnen die Tropfenränder in Richtung und Gegenrichtung des Feldes zu wandern. Der Randwinkel verringert sich infolge der Tropfenausdehnung bei konstantem Volumen. Auf diese Weise bewegt sich der Tropfen entlang der Isolierstoffoberfläche und vermindert die zuvor tropfenfreien Flächen. Für die noch verbleibenden Trockenzone wird bei einer Feldstärke von etwa 7,2 kV/cm bis 10 kV/cm [45] unter Normalbedingungen infolge des Townsend-Mechanismus ein Überschlag einleitet. Die Zeit bis zum Überschlag ist bei den durchgeführten Untersuchungen näherungsweise proportional zur

Viskosität der Flüssigkeit. Diese Beobachtung wird auf die Beweglichkeit der Flüssigkeit zurückgeführt, die sich auf der Isolierstoffoberfläche in Feldrichtung fortbewegt.

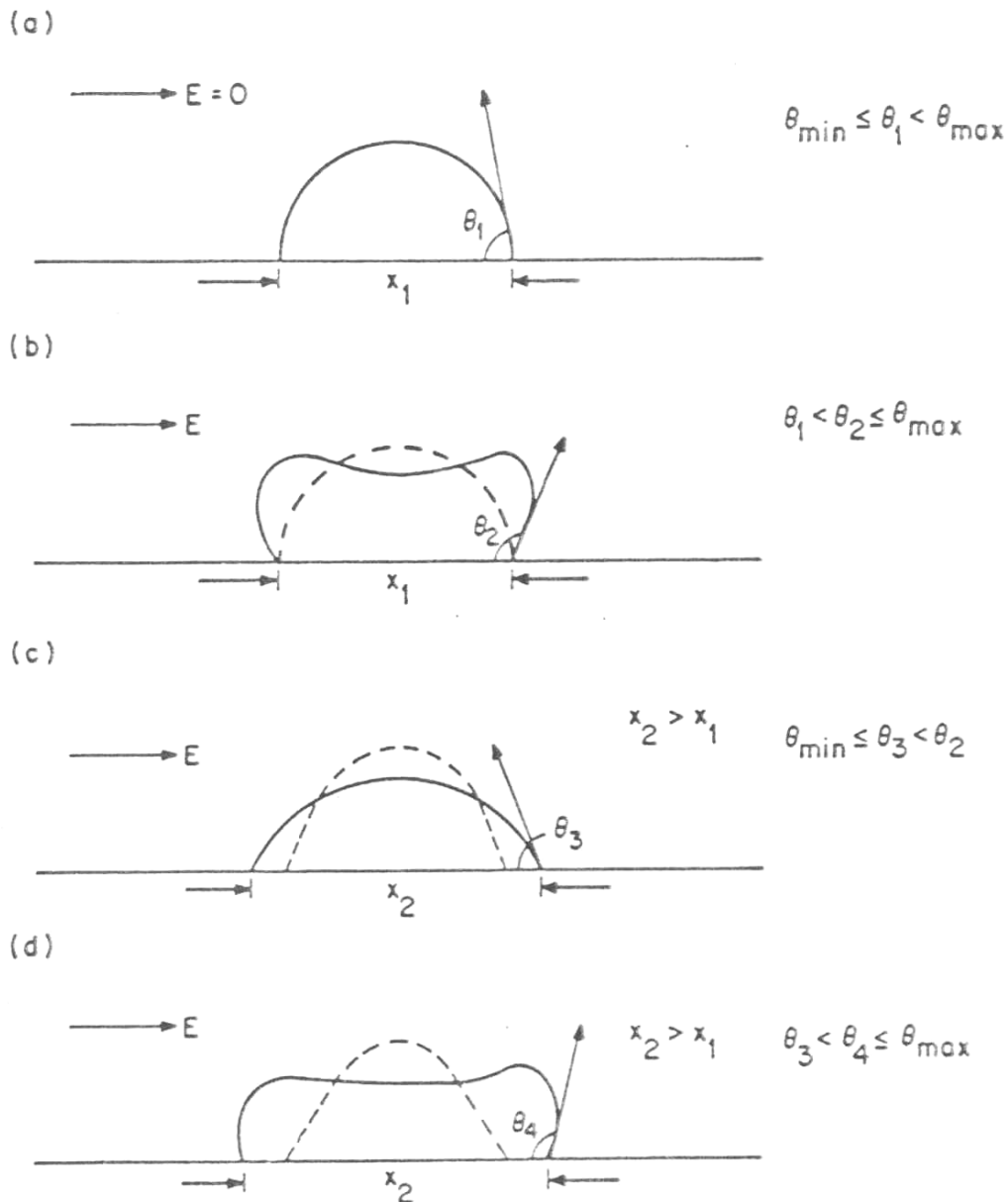


Bild 2.4: Tropfenverformungen bei einem konstantem hohen Gleichfeld parallel zur Oberfläche [45]

Die an singulären Tropfen beobachteten hydrodynamischen Mechanismen können in weiteren Experimenten bei [45] auch für Tropfenbeläge bestätigt werden. Nach dem einmaligen Anlegen einer impulsförmigen Gleichspannung bilden die zuvor

einzelnen Tropfen des Tropfenbelages aneinanderhängende Flüssigkeitsfilme oder Wasserpfade. Die zusammenhängenden Tropfenbeläge werden bei der verwendeten Anordnung aus zehn bis zwanzig ursprünglich einzelnen Tropfen gebildet. Durch diese zusammenhängenden Beläge kann ein Überschlag bei wesentlich niedrigeren Spannungen stattfinden.

In [46] werden anhand von durchgeführten Experimenten bei hohen Gleichspannungen zwei Überschlagsmechanismen auf feuchten Isolierstoffoberflächen systematisiert. Einerseits erfolgt bei hohen Spannungen ein elektrischer Überschlag, der mit dem Townsend- und Streamermechanismus erklärt werden kann. Andererseits wird der zeitlich langsamere Überschlag auf elektromechanische Prozesse aufgrund von Tropfendehformationen und dem Zusammenfließen von Tropfen zurückgeführt. In Experimenten können Überschlüge aus der Kombination beider Mechanismen, aber auch bei niedrigeren Spannungen Überbrückungen der Isolierstrecken nur aufgrund von Tropfenbewegungen ohne elektrischen Überschlag beobachtet werden.

In [47] werden für singuläre Tropfen die Versuchsparameter von [45] aufgegriffen und erweitert. Der Überschlagsmechanismus im parallel zur Isolierstoffoberfläche herrschenden Feld wird für Tropfenvolumen von 20  $\mu\text{l}$  bis 200  $\mu\text{l}$  sowohl bei hohen Gleich- als auch Wechselspannungen untersucht. Durch die Erhöhung des Tropfenvolumens nimmt der Wert der Überschlagsspannung bei allen untersuchten Materialien Teflon, Paraffin, Plexiglas und Glas ab. Es werden unterschiedliche Tropfenverhalten für Gleich- und Wechselspannungs-Beanspruchungen beobachtet. Während bei einer ansteigenden Gleichspannung ruckartige Bewegungen der Tropfen in Form von Hystereseeerscheinungen nach [45] bestätigt werden können, wird bei einer hohen Wechselspannung eine kontinuierliche Verformung der Tropfen festgestellt. Bei Wechselspannung werden Resonanzerscheinungen an der Tropfenoberfläche mit abnehmender Amplitude bei zunehmender Frequenz der anliegenden Wechselspannung aufgenommen. Die unterschiedlichen Verformungen in Abhängigkeit des Tropfenvolumens und der Frequenz der Wechselspannung werden Schwingungsmoden von freien Tropfen im elektrischen Feld zugeordnet.

In [47] wird wie auch in [45] bewiesen, daß die Verformungen und Instabilitäten eines singulären Tropfens auf einer hydrophoben Oberfläche in einem parallelen

elektrischen Feld den gleichen Gesetzmäßigkeiten folgen, die für freie Tropfen im elektrischen Feld verwendet werden. Für geringe Randwinkel, wie dies z.B. bei Glas vorliegt, sind die Mechanismen von freien Tropfen nicht auf liegende Tropfen anwendbar [47]. Die in [48] beschriebenen Experimente mit mehreren singulären Tropfen in einer Reihe auf hydrophoben Isolierstoffoberflächen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Modellvorstellungen freier Tropfenpaare nach [49].

In [43] wird ein singulärer Tropfen einem hohen elektrischen Gleichfeld ausgesetzt, wobei die leitende Verbindung zwischen Elektrode und Tropfenrand durch einen metallischen Kontakt hergestellt wird. Auf diese Weise werden Entladungserscheinungen entlang der Tropfenoberfläche beobachtet. Aus den Untersuchungen wird das in Bild 2.5 [43] dargestellte Ersatzschaltbild für einen Tropfen auf einer Isolierstoffoberfläche abgeleitet. In [43] werden Bildaufnahmen von Leuchtkanälen bei Überschlägen an einzelnen Tropfen festgehalten.

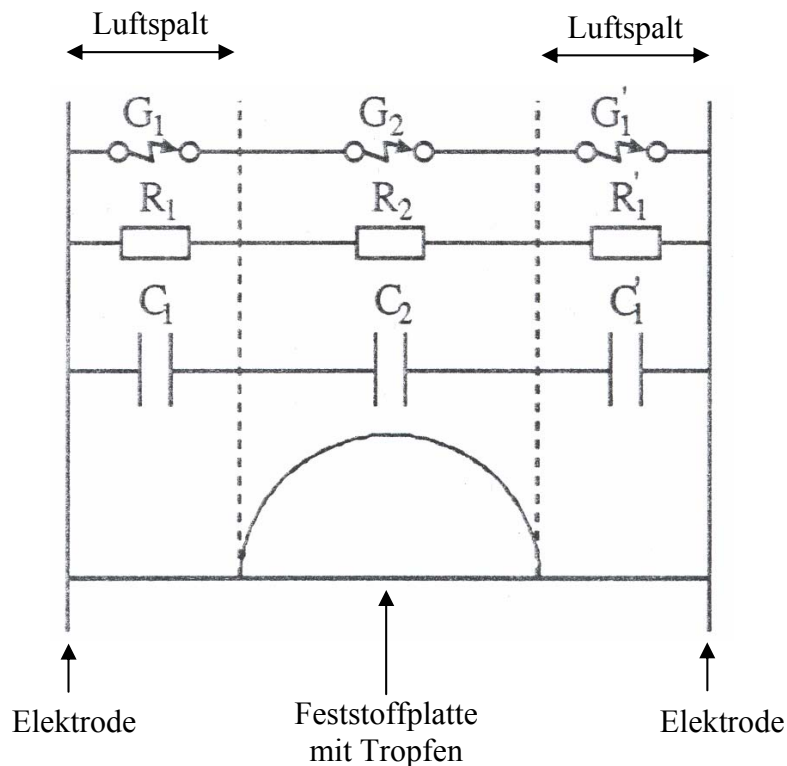


Bild 2.5: Elektrisches Ersatzschaltbild für einen Tropfen auf einer Isolierstoffoberfläche [43]

Bei einer Beanspruchung mit hoher Wechselspannung werden in [50] verschiedene Phänomene an Tropfen beobachtet. Es erfolgt eine Umbildung der Feuchteschicht bei einer kritischen Spannungshöhe. Dabei werden Veränderungen der Positionen zwischen zwei Tropfen zueinander im elektrischen Wechselfeld beobachtet, die teilweise zu einem Zusammenfließen der Tropfen führen. Mit einer Restlichtverstärkerkamera werden Entladungserscheinungen an den Tripelpunkten abrollender Tropfen dokumentiert.

### **2.3.3 Teilentladungen an singulären Tropfen**

Bevor es zu starken Leuchterscheinungen bei einer Instabilität eines Tropfens kommt, setzen zuvor Teilentladungen ein. Diese können nach [51] und [52] zwischen Tropfen einer Fremdschicht auf einer Isolatoroberfläche gemessen werden. In [51] werden zwischen der Formation von Tropfen zeitliche Pausen in der Teilentladungsaktivität festgestellt.

In [8] wird ein Zusammenhang zwischen elektrohydrodynamischen Vorgängen an Tropfenbelägen, wie Tropfendehformationen und Entladungserscheinungen, und dem Einsetzen von Teilentladungen hergestellt. In experimentellen Untersuchungen werden einzelne Tropfen und Tropfenketten hohen Wechselspannungen und hohen impulsförmigen Spannungen ausgesetzt. Es werden horizontale Isolierstoffoberflächen bestehend aus Silikonelastomeren mit zwei aufgesetzten Metallelektroden verwendet. Im folgenden werden die Untersuchungen von [8] an singulären Tropfen näher betrachtet.

Bei Wechselspannungs-Beanspruchung werden diskrete schwach leuchtende fadenförmige Entladungskanäle zwischen einem auf dem Prüfkörper aufgesetzten Tropfen und der freiliegenden Elektrode des Prüfkörpers beobachtet. Diese Entladungen werden dem Streamermechanismus zugeordnet. Bei der Teilentladungsmessung zeigen sich in der positiven Halbwelle der anliegenden hohen Wechselspannung größere Teilentladungs-Häufigkeiten und im Mittel auch höhere Teilentladungs-Pegel als in der negativen Spannungshalbwelle, was als typisch für Entladungen in Elektrodenanordnungen an Oberflächen fester Isolierstoffe beschrieben wird.



Bei einer konstanten Wechselspannung werden Schwankungen der Intensität der Teilentladungen an Tropfen gemessen, wobei auch Teilentladungen für mehrere Sekunden aussetzen können. Dieses Verhalten wird mit den sich in unregelmäßigen Abständen abwechselnden zeitlichen Phasen einer Deformation und Formstabilisation der Tropfen erklärt.

Nach der Abschaltung der Hochspannung können bleibende Deformationen an Tropfen beobachtet werden, was als Ursache für eine partielle Verringerung der Hydrophobie unmittelbar vor dem Tropfen auf der Isolierstoffoberfläche vermutet wird.

Zwischen zwei Tropfen werden ebenfalls Streamerentladungen wie bei einem einzelnen Tropfen beobachtet. Zusätzlich wird nach einigen Sekunden eine weitere Entladungsart festgestellt, die durch kleine ortsstabile Glimmpunkte von einigen Sekunden Dauer zwischen den Tropfen gekennzeichnet ist. Es wird vermutet, daß diese Glimmentladungen in den gebildeten Wasserspuren zwischen den Tropfen entstehen. Diese Entladungserscheinungen mit einer Ladung von ca. 0,5 pC verlöschen nach dem Abtrocknen der Wasserspur. Im Gegensatz hierzu sind Streamerentladungen energiereicher mit einem Ladungsumsatz von ca. 50 pC.

Untersuchungen an Tropfen, die in einer Reihe angeordnet sind, zeigen eine Abnahme der kritischen Feldstärke zur Einleitung einer Instabilität. Dieser Effekt wird verstärkt mit zunehmender gegenseitiger Annäherung der Tropfen, so wie dies auch von zwei freien Tropfen im elektrischen Feld bekannt ist.

Bei einer impulsförmigen Spannungsbeanspruchung deformiert sich ein einzelner Tropfen auf einer Isolierstoffoberfläche ruckartig und generiert dabei einen Teilentladungs-Einsatz. Die Zündung der Teilentladungen erfolgt nicht synchron mit dem Erreichen des Scheitelwertes der Spannung, sondern setzt mit einer Verzögerung von mehreren Millisekunden ein. Die Verzögerung des Teilentladungs-Einsatzes wird als charakteristisch für Wassertropfen bezeichnet, die durch eine Trägheit der Deformation des Tropfens hervorgerufen wird. Eine Ursache der Zeitverzögerung durch andere Parameter kann ausgeschlossen werden, da Untersuchungen mit einer metallischen Spitze anstelle des Tropfens sofortigen Teilentladungs-Einsatz zeigt unter sonst unveränderten Bedingungen.

Der Einfluß der verwendeten Prüfkörpergeometrie wird in [8] ebenfalls herausgearbeitet. Es wird zwischen zwei Teilentladungsursachen unterschieden. Teilentladungen werden entweder durch die äußere Geometrie der Elektrodenanordnung oder durch eine Instabilität eines Tropfens hervorgerufen. Die Position eines Tropfens in der Nähe der freiliegenden Elektroden hat einen Einfluß auf das Teilentladungsverhalten. Dabei wird meßtechnisch bestätigt, daß Tropfen in Elektrodennähe geringere Teilentladungs-Einsatzspannungen aufweisen als Tropfen mit gleichem Volumen bei einem größeren Abstand zur Elektrode unter gleicher Feldbeanspruchung. Die Teilentladungen, erzeugt durch die Prüfkörpergeometrie, unterstützen den Einsatz der Instabilität eines Tropfens, der durch seine Anwesenheit eine zusätzliche Inhomogenität des elektrischen Feldes hervorruft.

#### **2.3.4 Versuchstechniken zur Analyse von Tropfen auf Isolierstoffoberflächen**

In [53], [54] und [55] werden experimentelle Untersuchungen an Tropfen mit Hilfe optischer Aufnahmesysteme und softwaregesteuerter Auswertesysteme beschrieben. Bei diesen Untersuchungen werden Tropfenbeläge im elektrischen Feld beobachtet. Bei [53] werden spezielle Algorithmen entwickelt, um eine Automatisierung zur Beurteilung des Benetzungsgrades von Tropfenbelägen zu erreichen. In [54] wird eine Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt, um Silikonoberflächen aus der Perspektive der Draufsicht hinsichtlich der Hydrophobieveränderungen zu beurteilen. In [56] wird das Überschlagsverhalten von Silikon- und Porzellanoberflächen miteinander verglichen. Bei Tropfen auf Silikonoberflächen können Oszillationsbewegungen der Tropfen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera vor dem Überschlag beobachtet werden, während der Überschlag bei Porzellanoberflächen spontan ohne eine Tropfenverformung stattfindet. In [57] werden Teilentladungsmessungen und begleitende Feldberechnungen an einzelnen Tropfen auf Silikonoberflächen bei der Beanspruchung mit Wechselspannung vorgestellt. Es werden Tropfen sowohl definiert mit einer Pipette auf der Isolierstoffoberfläche aufgetragen als auch durch Kondensation mit einem speziellem Kühlungsverfahren erzeugt, z.B. in [51], [58]. Tropfenbeläge auf Silikonoberflächen werden in [59] untersucht. Dabei wird der gemessene Ableitstrom mit dem dynamischen Randwinkel in Beziehung gesetzt.

## **2.4 Berechnungen von Feuchte auf Isolierstoffoberflächen**

### **2.4.1 Anwendungen von Simulationsrechnungen**

Für die Konstruktion und Formgebung von Isolierkomponenten werden Simulationsrechnungen eingesetzt, um kritische Bereiche mit erhöhten Feldstärken festzustellen. Diese Berechnungen berücksichtigen oft nur den trockenen Zustand einer Isolierstoffoberfläche. Bei der Anwesenheit von Feuchte kann sich der Feldverlauf jedoch erheblich verändern. Zur Beurteilung des elektrischen Feldes im realen Einsatz von Isolierkomponenten werden Simulationsrechnungen unter der Berücksichtigung von feuchten Belägen auf der Isolierstoffoberfläche benötigt. Auch können diese Berechnungen zur Klärung von Mechanismen des Überschlagsverhaltens oder der Auswirkung einzelner Tropfen auf den Feldstärkeverlauf beitragen. Im folgenden werden einige Simulationsmodelle vorgestellt, die feuchte Schichten oder Tropfenbeläge berücksichtigen.

### **2.4.2 Modellierung des Überschlagsverhaltens und des Ableitstroms**

In [60] wird ein dynamisches Modell zur Berechnung des Überschlagsverhaltens einer oberflächenbedeckenden Fremdschicht mit Beanspruchung einer Wechselspannung dargestellt. Bei einer vorgegebenen anliegenden Spannung, der Geometrie des Isolierkörpers und der Volumenleitfähigkeit der Verschmutzung werden in den Berechnungen die zeitliche Entwicklung des Stromes auf der Isolierstoffoberfläche, der Lichtbogenwiderstand, Ausbreitungsgeschwindigkeit, Ladung zwischen den Elektroden und Zeit bis zum Überschlag berücksichtigt. Die Oberfläche des verschmutzten Isolators wird durch ein Netzwerk aus Widerständen, Induktivitäten und Kapazitäten nachgebildet. Die nichtlineare Charakteristik des Lichtbogens wird ebenfalls berücksichtigt. Falls unter den vorgegebenen geometrischen und elektrischen Bedingungen kein Überschlag entsteht, wird dies im Simulationsprogramm erkannt und der Ableitstrom auf der Isolatoroberfläche berechnet.

### 2.4.3 Modellierung abfließender Fremdschichten auf einer schiefen Ebene

In [61], [62], [63] und [64] wird ein Flüssigkeitsfilm, der an einer schiefen Ebene, die mit ihrer Oberfläche einem vertikalen homogenen Gleichfeld ausgesetzt ist und gleichzeitig als Erdelektrode dient, mit kinematischen und elektrodynamischen Größen beschrieben. In die Berechnungen werden für die Flüssigkeit die innere Reibung, die äußere Reibung an der Elektrode und die kinematische Viskosität einbezogen. In [61], [63] wird die Leitfähigkeit der Flüssigkeit als ideal leitend und in [64] als eine Leitfähigkeit endlicher Größe angenommen. Ein Vergleich der unterschiedlichen Leitfähigkeiten zeigt, daß bei einer endlichen Leitfähigkeit aufgrund der betrachteten Energien sich die Abfließgeschwindigkeit des Flüssigkeitsfilmes im elektrischen Feld reduziert.

### 2.4.4 Modellierung flächiger Fremdschichten auf Isolierstoffoberflächen

Ein Vergleich von drei Berechnungsmethoden, der Finite-Differenzen-Technik, der Finite-Elemente-Technik und einer entwickelten analytischen Methode, wird in [65] zur zweidimensionalen Modellierung des elektrostatischen Feldes und der Potentialverteilung an verschmutzten Freiluftisolatoren durchgeführt. Hierbei wird ein zylinderförmiger Modellisolator flächig in sich abwechselnde Trocken- und Feuchtezonen unterteilt und die Feldverteilung entlang der Oberfläche berechnet.

In [66], [67], [68] wird ein Verfahren zur Berechnung von elektrischen Mischfeldern mit kapazitiven und ohmschen Komponenten vorgestellt. Es basiert auf dem Ersatzladungsverfahren der Elektrostatik und berücksichtigt Oberflächen- und Volumenleitfähigkeiten. Das Rechenverfahren benutzt bei vorgegebener Frequenz komplexe Ladungen. Die Konturen der Dielektrika werden berücksichtigt mit den Randbedingungen für die Kontinuität des Stromes in beliebigen Punkten dieser Konturen. Für einen zylindrischen Modellisolator und einen Stützisolator mit verschmutzten Oberflächen werden zwei- und dreidimensionale Feldstärke- und Potentialverläufe dargestellt. Die Berechnungsmethoden in [65], [66], [67] und [68] berücksichtigen durchgehende Fremdschichten auf Isolierstoffoberflächen, jedoch keine Fremdschichten bestehend aus diskreten Tropfen mit dazwischen befindlichen Trockenbereichen.

#### 2.4.5 Modellierung singulärer Tropfen auf Isolierstoffoberflächen

In [69] wird eine modifizierte Methode des Ersatzladungsverfahrens (CSM = Charge Simulation Methode) vorgestellt, um das elektrische Potential und die Feldverteilung entlang von Freiluftisolatoren der Hochspannungstechnik zu berechnen. Bei diesem Verfahren werden Isolierstoffoberflächen durch Flächenladungen und Elektrodenoberflächen durch diskrete Punkt-, Linien-, Ring- oder Flächenladungen nachgebildet. An den Grenzflächen wird im Gegensatz zu elektrostatischen Methoden die Stromdichte berücksichtigt. Mit dem in [69] beschriebenen Verfahren wird zunächst der reale Isolator nachgebildet, und es werden die Feldverläufe entlang der Isolierstoffoberfläche unter sauberen und trockenen Bedingungen berechnet. Die Berechnungen für Isolatoren aus keramischen Werkstoffen und für Isolatoren aus Polymerwerkstoffen beruhen auf unterschiedlichen Gleichungssystemen aufgrund der verschiedenen Geometrien und Materialeigenschaften der beiden Isolatortypen. Als Ergebnis geht hervor, daß für die berechneten Isolatoren aus keramischem Werkstoff für Nennspannungen ab  $U_m = 230 \text{ kV}$  Koronaentladungen auch bei sauberen und trockenen Oberflächen auftreten, während dies für Isolatoren aus Polymerwerkstoff der gleichen Spannungsebene nicht der Fall ist. Die Berechnungsergebnisse werden durch die in Realität auftretenden Entladungserscheinungen an Isolatoren bestätigt.

Eine Erweiterung des in [69] verwendeten Verfahrens ermöglicht in [70] die Berechnung eines dreidimensionalen Feldverlaufs auf Isolatoroberflächen bei Anwesenheit von singulären Wassertropfen mit dazwischenliegenden Trockenzonen. Dabei werden Wassertropfen mit gleichem Volumen und gleichem Abstand zueinander auf einem zylindrischen Modellisolator nachgebildet und deren Einfluß auf den Feldstärkeverlauf auf der Isolierstoffoberfläche herausgearbeitet. Der Vergleich von Wassertropfen mit halbkugelförmiger Form und mit halbelliptischer Form zeigt den Einfluß der Tropfenform auf den Feldstärkeverlauf. Bei der Untersuchung des Abstandes der Tropfen zueinander werden bei nahe zueinander angeordneten Tropfen hohe Feldstärken festgestellt, die Entladungserscheinungen auslösen können. In [71] werden die Aussagen bezüglich singulärer Tropfen auf Isolierstoffoberflächen durch weitere Berechnungen vervollständigt. Große Wassertropfen können zu intensiveren Entladungserscheinungen führen als kleine

Wassertropfen. Dieser Effekt wird verstärkt, wenn sich die Wassertropfen in der Nähe der Hochspannungselektrode befinden.

In [72], [73], [74], [75], [76], [77] und [78] werden mit einer Methode basierend auf der Finiten-Integrations-Theorie (FIT) ebenfalls singuläre Wassertropfen auf Isolierstoffoberflächen nachgebildet. In den Veröffentlichungen [73] und [75] werden die Berechnungsergebnisse eines elektrostatischen und eines elektroquasistatischen Ansatzes gegenübergestellt. Der Vergleich läßt die Schlußfolgerung zu, daß bei trockenen Isolierstoffoberflächen die elektrostatische Feldberechnung angewendet werden kann, nicht aber im Fall einer Oberflächenverschmutzung mit leitenden Fremdschichten, da hier der Verschiebungsstrom von großer Bedeutung ist und daher zu berücksichtigen ist. Diese Forderungen werden in den Simulationen erfüllt und ortsabhängige Permeabilitäten und ortsabhängige Leitfähigkeiten berücksichtigt. Auf der Isolierstoffoberfläche wird jeder Tropfen einzeln generiert, so daß die Anzahl der Tropfen, ihre Form und ihre Volumenleitfähigkeiten definiert werden können. Die Anordnung der singulären Tropfen kann in einer Reihe geschehen, aber auch zufällig auf der Isolierstoffoberfläche verteilt sein. Als Ergebnis der Simulationsrechnungen werden dreidimensionale Feldbilder oder einzelne Komponenten der dreidimensionalen Feldgrößen dargestellt.

## **3 Ziele der vorliegenden Arbeit**

### **3.1 Einordnung in das Gesamtthema**

Der Fragestellung der vorliegenden Arbeit ergibt sich aus den Vorgängerarbeiten [35], [50], [51], [79], [80] und [81]. Diese beschäftigen sich mit der Alterung von Isolierstoffoberflächen und den diese einleitenden Mechanismen. Es werden unterschiedliche Phänomene der Alterung bei luftisolierten Innenraumanlagen der Mittelspannungstechnik unter erschwerten Umgebungsbedingungen experimentell untersucht. Der Schwerpunkt dieser Arbeiten liegt bei der Bewertung und Auswahl alterungsbeständiger Epoxidharz-Formstoff-Werkstoffe, sowie der Mechanismenklärung in der Alterungsfrühphase von polymeren Isolierstoffen zur Modellierung der Oberflächenalterung.

In [35] werden an stabförmigen Stützisolatoren mit Befeuchtungsverfahren Alterungsprozesse eingeleitet und Diagnosegrößen zur Beurteilung der Alterungsintensität ermittelt. Es werden hierzu Versuchstechniken aufgebaut, um die Modellisolatoren in Langzeitversuchen untersuchen zu können. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen wird ein Alterungsmodell für die Alterungsfrühphase von Innenraumisolierungen entwickelt.

In [50] werden Wechselwirkungen zwischen elektrischen und chemisch-physikalischen Beanspruchungen auf polymeren Isolierstoffoberflächen untersucht. Mit dem Aufbau einer geeigneten Versuchstechnik können Teilentladungen an Fremdschichten auf Isolierstoffoberflächen nachgewiesen werden, die als Ursache für die Einleitung der Alterungsfrühphase gelten. Bei den experimentellen Untersuchungen werden auch optische Phänomene an der Fremdschicht beobachtet, wie das Zusammenfließen von Tropfen und Entladungserscheinungen an den Tripelpunkten.

In [51] werden weitere Verfahren mit unterschiedlichen Methoden zur Aufbringung von Feuchteschichten auf die Isolierstoffoberfläche entwickelt, um Epoxidharz-Formstoffsysteme im Labor unter erschwerten Innenraumbedingungen bei gleichzeitig anliegender Wechselspannung beschleunigt zu altern. Die

Oberflächenzustände der gealterten Proben werden mit geeigneten Diagnosegrößen charakterisiert. Aus den Ergebnissen der Diagnosemessungen wird eine Modellvorstellung entwickelt, die das Auftreten und den Ablauf von Teilentladungen auf tropfenbedeckten Isolierstoffoberflächen beschreibt.

Der Einfluß der Systemkomponenten der Epoxidharz-Prüfkörper auf das Lang- und Kurzzeitverhalten wird in [79] untersucht. In Kurzzeitprüfungen werden die Kriechstromfestigkeit und der Oberflächenwiderstand untersucht. In Langzeituntersuchungen mit einer Betauungsmethode nach dem Prinzip der natürlichen Kondensation werden verschiedene Epoxidharzsysteme gealtert, um eine Differenzierung und eine Werkstofffreihung aufzustellen. Der Einfluß der Systemkomponenten auf das Alterungsverhalten wird hierbei herausgearbeitet.

Der Einfluß wässriger natriumchloridhaltiger Fremdschichten auf den Oberflächenzustand während der Alterung wird in [80] näher betrachtet. Durch die erhöhten Volumenleitfähigkeiten werden Teilentladungen begünstigt, die wiederum die Oberfläche des Isolierwerkstoffes angreifen und eine Erosion einleiten. Die Untersuchungen zeigen, daß verschiedene Diagnoseverfahren zur Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit herangezogen werden sollten, um eine eindeutige Aussage über den Alterungszustand des Isolierprüfkörpers treffen zu können.

Die eingesetzten Prüfverfahren zur Alterung von Modellprüfkörpern im Labor werden in [81] miteinander verglichen, um deren Eignung in Hinblick auf eine realitätsnahe Alterung unter Innenraumbedingungen zu bewerten. Das Ziel ist hierbei, die Alterungsbeständigkeit eines Prüfkörpers in möglichst kurzer Zeit zu untersuchen, ohne durch die Zeitraffung den Alterungsmechanismus zu verändern. In die Untersuchungen wird auch der Herstellungsprozeß der Prüfkörper einbezogen. Das zur Herstellung von Epoxidharzkörpern notwendige Formtrennmittel begünstigt die Resistenz gegen Alterungserscheinungen durch seine hydrophoben Eigenschaften. Bei den Daueruntersuchungen an Modellprüfkörpern mit feuchten Fremdschichten und gleichzeitig anliegender Hochspannung kann eine Änderung des Alterungsmechanismus festgestellt werden. Diese wird durch die Verwendung zu hoch gewählter Volumenleitfähigkeiten der Fremdschichten hervorgerufen. Eine Mechanismenänderung in der Alterungsfrühphase ist bei zeitraffenden realitätsnahen Prüfmethode im Labor zur Untersuchung des Alterungsverhaltens von



Innenraumisolierungen zu vermeiden, da die Frühphase der Alterung für Innenraumbedingungen charakteristisch ist.

In den bisherigen Arbeiten wird die feuchte Fremdschicht auf der Isolierstoffoberfläche auf verschiedene Weisen hergestellt, so daß sich eine unregelmäßige Verteilung der Tropfen auf der Oberfläche ergibt, wie dieses auch an realen Bauteilen bei Betrieb unter erschwerten Umgebungsbedingungen der Fall ist. Die Diagnosegröße Ableitstrom wird für den Status der Alterung herangezogen. Der Ableitstrom auf der Prüfkörperoberfläche zwischen der Hochspannungs- und Erdelektrode erhöht sich, sobald sich singuläre Tropfen zu flächigen Tropfenbelägen formieren. Der Vorgang, bei dem sich diese Veränderung vollzieht, ist bisher noch nicht detailliert untersucht worden. Die Vorgänge an einzelnen Tropfen wurden bisher nur andeutungsweise untersucht. Das detaillierte Verhalten der Tropfen im elektrischen Feld vor dem zeitlichen Einsetzen von Mikroentladungen kann mit den bisher durchgeführten Untersuchungen nicht beschrieben werden.

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, die in der Alterungsfrühphase stattfindenden Mechanismen an singulären Tropfen zu klären, bevor sich diese zu flächigen Tropfenbelägen formieren. Bild 3.1 gibt eine Übersicht zur Einordnung der hier behandelten Fragestellungen in die Thematik der Alterung fester polymerer Isolierstoffoberflächen. Die bisher behandelte Thematik ist im linken Pfad des Diagramms angedeutet. Polymere Isolierstoffoberflächen wurden gealtert mit dem Ziel, eine Werkstoffbewertung durchführen zu können. Hierzu wurden verschiedene Versuchstechniken geschaffen, die Alterungsbedingungen in der Alterungsfrühphase im Labor nachbilden konnten. Durch die Erzeugung feuchter Fremdschichten bei gleichzeitig anliegender Spannung am Prüfkörper wurde eine Alterung hervorgerufen, die mit Hilfe geeigneter Diagnosemittel bewertet werden konnte. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung und Weiterentwicklung von Alterungsmodellen, die sich auf die Alterungsfrühphase polymerer Isolierwerkstoffe beziehen. Mit einer geeigneten Versuchstechnik sollen Umbildungsvorgänge von Tropfenschichten und relevante Phänomene an einzelnen Tropfen ermöglicht werden. Dieser Untersuchungsschwerpunkt ist im rechten Pfad des Diagramms dargestellt. Die hervorgehobenen Felder in Bild 3.1 zeigen somit den Schwerpunkt dieser Arbeit.

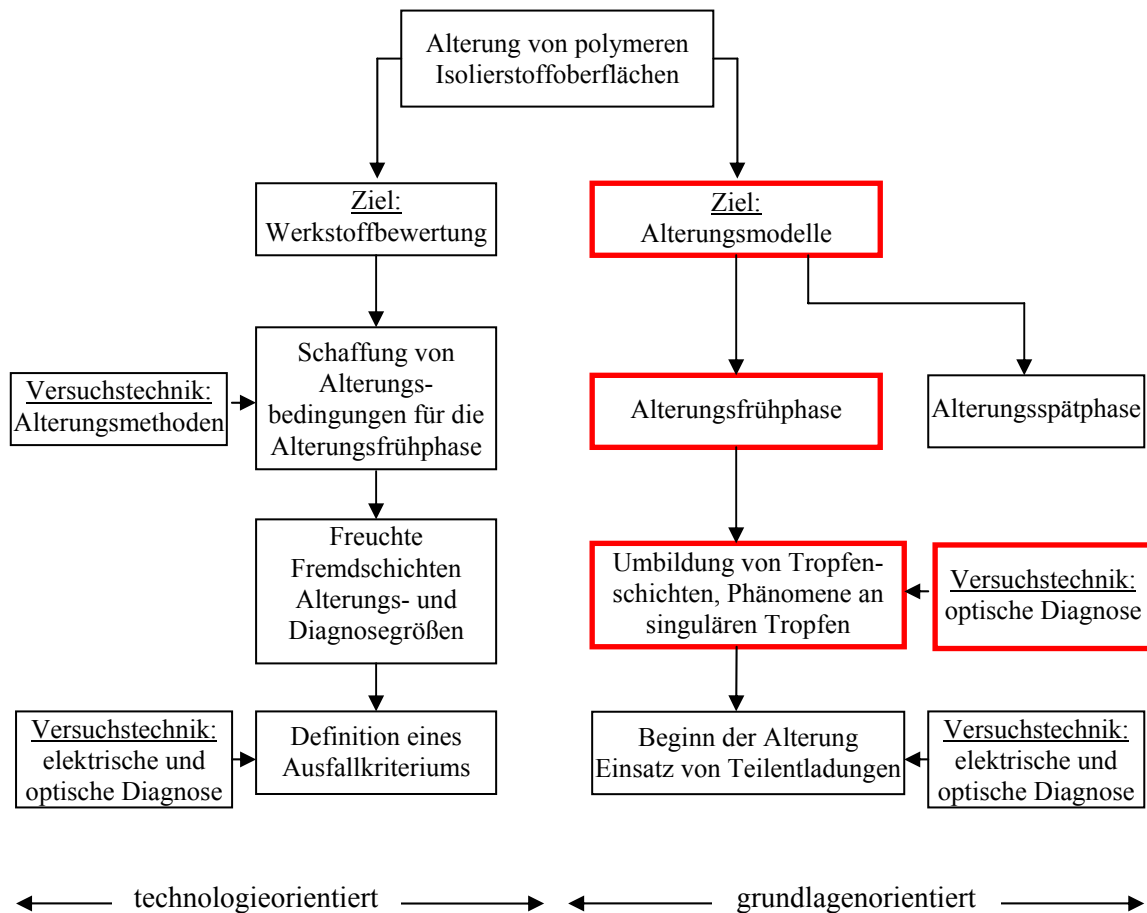


Bild 3.1: Überblick zur Einordnung der hier behandelten Fragestellung

### 3.2 Zielsetzungen

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Schaffung von Grundlagen bezüglich des Einsetzens von Alterungsmechanismen an elektrisch beanspruchten Isolierstoffoberflächen. Hierzu sollen die Vorgänge an singulären Tropfen auf polymeren Isolierstoffoberflächen im elektrischen Gleich- und Wechselfeld diagnostiziert und analysiert werden.

Zur Realisierung des Hauptzieles der Untersuchung elektrohydrodynamischer Prozesse an singulären Tropfen werden folgende Unterziele formuliert:

Zunächst werden Parameter zusammengestellt und deren Bedeutung aufgezeigt, die für die Beanspruchung von Isolierstoffoberflächen unter Feuchteeinfluß relevant sind.

Zur Diagnose der Vorgänge auf elektrisch belasteten Isolierstoffoberflächen wird eine geeignete Versuchstechnik gewählt, um relevante Parameter berücksichtigen und aussagekräftige Parameter analysieren zu können. Dabei ist die visuelle Beobachtung der Tropfen auf der Isolierstoffoberfläche bei anliegender Hochspannung als realitätsnahe Versuchstechnik von Bedeutung. Es wird dabei darauf geachtet, daß durch die Anwesenheit der Versuchseinrichtung die Vorgänge auf der Oberfläche nicht beeinflußt werden und das zu erzeugende elektrische Feld auf der Isolierstoffoberfläche durch äußere Einflüsse nicht verändert wird.

Beim Aufbau der Versuchstechnik wird darauf geachtet, daß alle Untersuchungen reproduzierbar wiederholt werden können. Dies betrifft die Erzeugung und Platzierung der Tropfen auf der Isolierstoffoberfläche, die Erzeugung und Messung der Hochspannung und die Wahl eines geeigneten Prüfkörpers.

Im Experiment werden singuläre Tropfen auf einem Prüfkörper reproduzierbar platziert und ihr Verhalten unter Bedingungen diagnostiziert, die für reale Anwendungen relevant sind. Bei der Durchführung der Experimente werden zunächst Parameterkombinationen herausgefunden, die für das Tropfenverhalten entscheidend sind und interessante Phänomene zeigen. Diese Phänomene werden dann systematisch untersucht und unter der Variation geeigneter Parameter die Einflußgrößen herausgearbeitet. Das Tropfenverhalten wird mit elektrischen Kenngrößen in Verbindung gebracht, die aus der Experimenten gewonnen werden.

Das Verhalten der Tropfen im elektrischen Feld wird analysiert und durch die Wahl geeigneter Kenngrößen zur Beschreibung des Tropfenverhaltens kategorisiert. Die Ergebnisse aus den Experimenten werden systematisiert und Verhaltensmuster bezüglich der Phänomene an Tropfen aufgestellt. Die gewonnenen Ergebnisse werden den erarbeiteten und aufgestellten Verhaltenskategorien zugeordnet.

Feld- und Kräfteberechnungen können weitere Erkenntnisse über die Ursache des Tropfenverhaltens geben. Zur Aufdeckung der Wechselwirkungen zwischen der Veränderung des elektrischen Feldes durch die Tropfen auf der Oberfläche und die Feldveränderung aufgrund der Tropfendeformation können mit ausgewählten Feld- und Kräfteberechnungen zusätzliche Erklärungen für das Tropfenverhalten gefunden werden. In den Experimenten werden relevante Eingabeparameter für die Modellierung der Vorgänge für Simulationsrechnungen ermittelt.

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen werden in Bezug auf reale Anwendungen bewertet und schließlich in den Ablauf der Alterung von festen polymeren Isolierstoffen eingeordnet. Eine Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse erfolgt durch eine Erweiterung eines Alterungsmodells.

## 4 Theoretische Betrachtungen

### 4.1 Die physikalischen Eigenschaften von Wasser

Wasser ist die chemische Verbindung von Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) zu Wasserstoffoxid ( $\text{H}_2\text{O}$ ). In Bild 4.1 [82] ist die molekulare Struktur von Wasserstoff, Sauerstoff und einem Wassermolekül dargestellt. Das Wasserstoffatom besteht aus einem Proton und einem Elektron. Im Sauerstoffatom befinden sich neben den Protonen im Atomkern zwei Elektronen in der inneren K-Schale und sechs Elektronen in der äußeren L-Schale. Das Wassermolekül wird durch die aus einem gemeinsamen Elektronenpaar bestehende O-H-Bindung, einer kovalenten Bindung, zusammengehalten. Die Atome des Wassermoleküls sind tetraederförmig angeordnet, wobei sich zentriert das Sauerstoffatom befindet, während die Zentren der Wasserstoffatome jeweils eine Ecke des Tetraeders besetzen. Die beiden Wasserstoffatome bilden mit dem zwischen ihnen liegenden Sauerstoffatom einen Winkel von  $\alpha = 104,5^\circ$  [83]. Die O-H-Bindungslängen betragen  $l = 95,7 \text{ pm}$  [84]. Der Abstand der beiden Wasserstoffatome beträgt  $a = 0,154 \text{ nm}$  [82]. Es ergibt sich ein Moleküldurchmesser von  $d = 0,275 \text{ nm}$ .

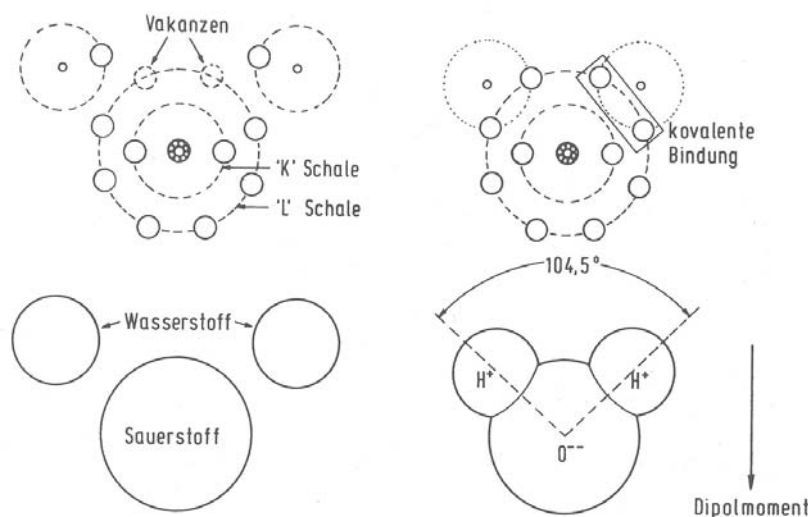


Bild 4.1: Molekulare Struktur von Wasserstoff, Sauerstoff und eines Wassermoleküls [82]

Aufgrund der unterschiedlichen Elektronegativitäten (EN) von Sauerstoff mit  $EN = 3,44$  und Wasserstoff mit  $EN = 2,20$  konzentrieren sich die vorhandenen Ladungen in unterschiedlichen Richtungen. Der Schwerpunkt der negativen Ladung liegt am Ort des Sauerstoffatoms, da dieses eine größere Elektronegativität aufweist als das Wasserstoffatom. Der Schwerpunkt der positiven Ladung liegt auf der Winkelhalbierenden zwischen den Protonen der Wasserstoffkerne, so daß das Wasserstoffatom positiv geladen ist. Da der positive und der negative Ladungsschwerpunkt nicht geometrisch zusammenfallen, kommt es zu einer Polarisierung des Wassermoleküls. Das Wassermolekül stellt einen permanenten Dipol dar mit einem elektrischem Dipolmoment von  $p = 6,17 \cdot 10^{-30} \text{ C}\cdot\text{m}$  [84].

Durch Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Wassermolekülen ziehen sich die positiven und negativen Partialladungen unterschiedlicher Wassermoleküle an. Jedes Molekül kann aufgrund seiner tetraederförmigen Struktur vier Wasserstoffbrücken eingehen. Diese starken elektrostatischen Wasserstoffbrückenbindungen begründen viele charakteristische Eigenschaften des Wassers. Einige Kennwerte sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Tabelle 4.1: Charakteristische Kennwerte von  $\text{H}_2\text{O}$

Kenngröße	Kennwert	Literaturstelle
Oberflächenspannung	$\gamma_L = 71,96 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$ bei $25^\circ \text{ C}$	[85]
Dynamische Viskosität	$\nu = 0,8937 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ bei $25^\circ \text{ C}$	[85]
Elektrische Volumenleitfähigkeit	$\kappa = 0,0635 \cdot 10^{-6} \text{ S/cm}$	[85]
Elektrisches Dipolmoment	$p = 6,17 \cdot 10^{-30} \text{ C}\cdot\text{m}$	[84]
Dipolmoment aus Polarisierung	$\mu = 1,85 \text{ Debye}$	[85]
	$= 0,58 \cdot 10^{-24} \text{ S}\cdot\text{m}$	[83]
Elektrische Dielektrizitätszahl	$\epsilon_r = 78,5$ bei $25^\circ \text{ C}$	[84]
	$\epsilon_r = 80,18$	[85]
Relative Molekülmasse	$m_r = 18,01534$ $= 2 \cdot 1,00797 + 1 \cdot 15,9994$ $= 2 \cdot m_H + 1 \cdot m_O$	[83]
Schmelzwärme	$333,73 \text{ J/g}$	[83]
Verdampfungswärme	$2282,2 \text{ J/g}$ bei $101,324 \cdot 10^3 \text{ Pa}$	[83]
Dichtemaximum	bei $+3,98^\circ \text{ C}$	[83]

## 4.2 Erscheinungsformen des Wassers

### 4.2.1 Aggregatzustände

Wasser ist ein Stoff, der in natürlicher Form in allen drei Aggregatzuständen flüssig, fest und gasförmig vorkommt. Die Aggregatzustände „Eis“, „Wasser“ und „Wasserdampf“ und die dazugehörigen Phasenübergänge sind in einem Diagramm in Bild 4.2 [82] dargestellt. Bei den Vorgängen „Gefrieren“, „Kondensation“ und „Resublimation“ wird Energie als Wärme frei, während bei den Übergängen „Schmelzen“, „Verdunstung“ und „Sublimation“ Energie hinzugeführt werden muß. Die Phasenübergänge Eis – Wasser – Eis sind von erheblich geringeren Energieumsätzen begleitet als die Phasenübergänge Wasser – Dampf – Wasser oder Dampf – Eis – Dampf [82]. Bild 4.3 zeigt die Bereiche der drei Phasen des Wassers in Abhängigkeit von Druck, Volumen und Temperatur [18]. Die Aggregatzustände sind durch den Gefrier- oder Schmelzpunkt und durch den Siede- oder Kondensationspunkt getrennt. Am Tripelpunkt (TP) bei der Temperatur von  $\vartheta = 273,16 \text{ K}$  und dem Druck von  $p = 6,09 \text{ hPa}$  befinden sich alle drei Phasen im Gleichgewicht. In diesem Punkt können alle Zustandsformen permanent nebeneinander existieren.

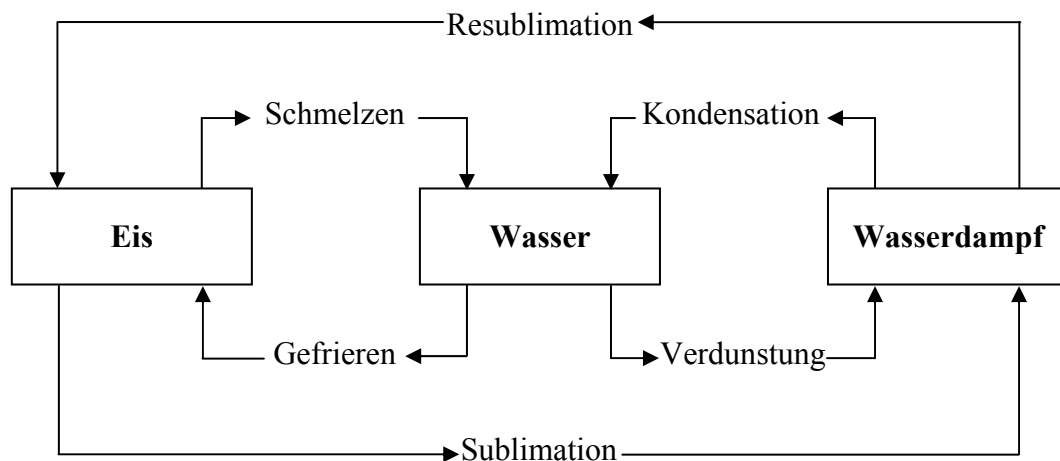


Bild 4.2: Aggregatzustände und Phasenübergänge von Wasser [82]

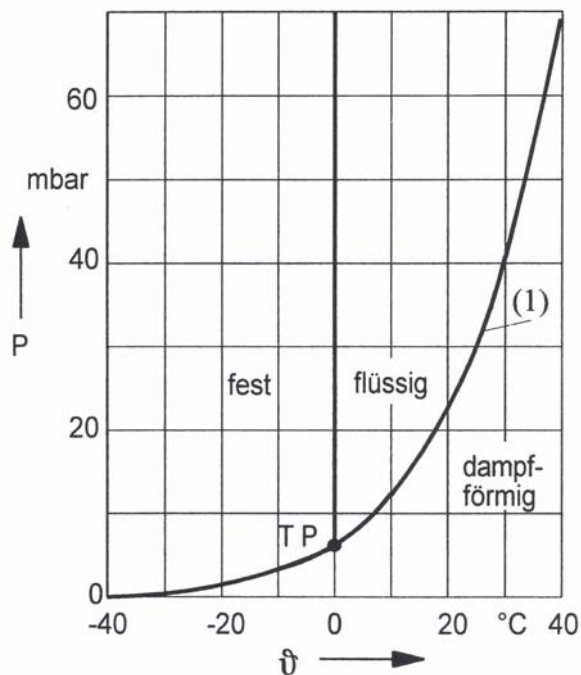


Bild 4.3: Zustandsänderungen von Wasser [18]

#### 4.2.2 Der feste Aggregatzustand von Wasser

Bei der Bildung von Eis ist die entstehende Anordnung der einzelnen Wassermoleküle zueinander von Druck und Temperatur abhängig. Es sind mindestens neun unterscheidbare Strukturformen des Eises bekannt. Hexagonales Eis entsteht bei der Kristallisation von flüssigem oder gasförmigem Wasser unter Normaldruck unterhalb von 0° C. Bei sehr niedrigen Temperaturen von -120 °C bis -140 °C bei gleichem Druck bildet sich eine kubische Form des Eises [86]. Weitere Modifikationen des Eises entstehen bei hohen Drücken von bis zu über  $p = 22$  kbar im Temperaturbereich von +80° C bis unter -160° C [86].

Im gewöhnlichen Eis, der hexagonalen Eismodifikation, ist jedes Sauerstoffatom tetraedisch von vier Wasserstoffatomen umgeben. Zwei dieser Wasserstoffatome sind über eine kovalente Bindung an dieses Sauerstoffatom gebunden, während die beiden anderen Wasserstoffatome von zwei benachbarten Wassermolekülen stammen und schwächer durch Wasserstoffbrückenbindungen an das Sauerstoffatom gebunden werden.



Beim Schmelzen von hexagonalem Eis beginnen einige Wasserstoffbrücken zu brechen. Dieser Prozeß setzt sich bei weiterer Erwärmung fort, so daß die Moleküle dichter aneinanderrücken können und somit die Dichte zunimmt. Diesem Effekt wirkt die thermische Molekularbewegung entgegen, die eine Expansion der Flüssigkeit hervorruft, so daß sich schließlich ein Dichtemaximum des Wassers bei  $\vartheta = 3,98\text{ °C}$  ergibt. Durch weitere Erwärmung verringert sich die Dichte, weil die Effekte der Wärmebewegung den gegenteiligen Einfluß weiterer Bindungsbrüche auszugleichen beginnen. [86]

Eis ist im wesentlichen ein Nichtleiter mit nicht meßbarer geringer Leitfähigkeit. Die bisher gemessene Leitfähigkeit von  $\kappa = 10^{-10}\text{ S/cm}$  bei  $\vartheta = -10\text{ °C}$  wird auf Oberflächendefekte zurückgeführt [86].

#### 4.2.3 Der flüssige Aggregatzustand von Wasser

Die Struktur des flüssigen Wassers beruht auf Wasserstoffbrückenbindungen, die einen Spezialfall von besonders starken Dipol-Dipol-Bindungen darstellen. Jedes Wassermolekül kann vier Wasserstoffbrücken mit Nachbarmolekülen ausbilden. Bei einer Wasserstoffbrücke verbindet sich ein Wasserstoffatom eines Wassermoleküls mit einem Sauerstoffatom eines anderen Wassermoleküls.

Es gibt unterschiedliche Modellvorstellungen des flüssigen Wassers, die in [87] gegenübergestellt werden. Die theoretischen Modelle unterscheiden sich in der mikroskopischen Struktur der Vernetzung der Wasserstoffbrückenbindungen. Bild 4.4 zeigt eine berechnete Momentaufnahme einer Struktur der Wasserstoffbrückenvernetzung in flüssigem Wasser unter Berücksichtigung von Wasserstoffbrücken mit einer Bindungsenergie von mehr als  $8,4\text{ kJ/mol}$  [84].

Chemisch reines Wasser hat eine elektrische Leitfähigkeit von  $\kappa = 4,4 \cdot 10^{-6}\text{ S/m}$  bei  $\vartheta = 18\text{ °C}$  [5]. Ursache dieser Restleitfähigkeit ist die Bildung von Ionen durch Eigendissoziation von Wassermolekülen. Bei der Dissoziation entstehen positive Hydroxinium-Ionen ( $\text{H}_3\text{O}^+$ -Ionen) und negative Hydroxid-Ionen ( $\text{OH}^-$ -Ionen), die eine Leitfähigkeit des Wassers hervorrufen. Auch besteht eine Rückreaktion in Form einer Neutralisation im Wasser, so daß aus den vorhandenen Ionen wieder

Wassermoleküle entstehen. Die Dissoziation und die gegenläufige Neutralisation laufen mit gleicher Reaktionsgeschwindigkeit ab, so daß bei einer konstanten Temperatur eine konstante Ionenkonzentration im flüssigen Wasser vorliegt.

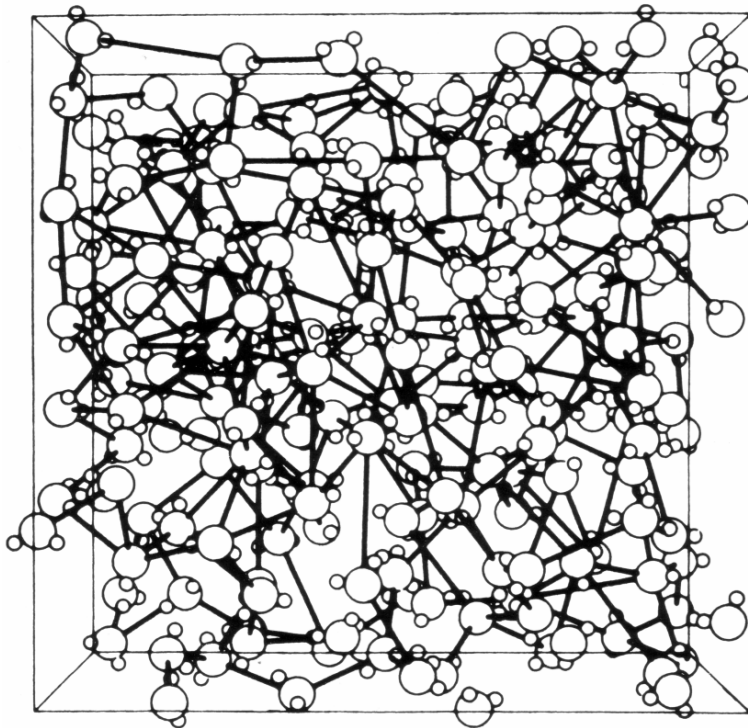


Bild 4.4: Momentaufnahme der Molekülanordnung von flüssigem Wasser [84]

#### 4.2.4 Der gasförmige Aggregatzustand von Wasser

Wasserdampf ist verdampftes gasförmiges Wasser, ein durchsichtiges und farbloses Gas, das als Bestandteil in der Luft enthalten ist. Im Wasserdampf liegen außer  $\text{H}_2\text{O}$ -Molekülen auch  $(\text{H}_2\text{O})_2$ -Moleküle vor.

Die Sättigung der Luft, d.h. der maximal mögliche Wasserdampfgehalt, hängt von der Temperatur ab. Je höher die Temperatur der Luft ist, desto mehr Wasserdampf kann sie aufnehmen. In Bild 4.5 [88] ist die maximale absolute Feuchte in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Die Luft kann beispielsweise bei  $\vartheta = +30\text{ °C}$  über das zehnfache an Wasserdampf aufnehmen als bei  $\vartheta = -10\text{ °C}$  [88].

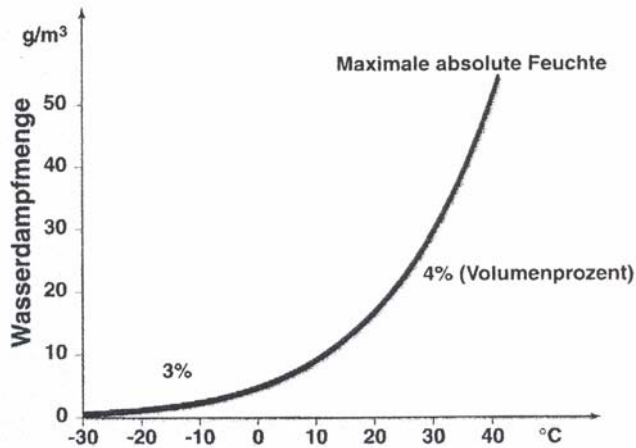


Bild 4.5: Maximale Wasserdampfmenge in Abhängigkeit der Temperatur [88]

Zwei weitere Kenngrößen für die Feuchte sind die relative Feuchte und der Taupunkt  $\tau$ . Die relative Feuchte, gemessen von 0 % bis 100 %, vergleicht den aktuellen Wasserdampfdruck mit dem bei der aktuellen Temperatur maximal möglichen Sättigungsdampfdruck. Bei Eintritt von Kondensation nennt man die dann erreichte Temperatur den Taupunkt. Bild 4.6 zeigt den Zusammenhang zwischen Dampfdruck und relativer Luftfeuchte mit der Lufttemperatur sowie Feuchteänderungen durch Dampfzufuhr oder Abkühlung.

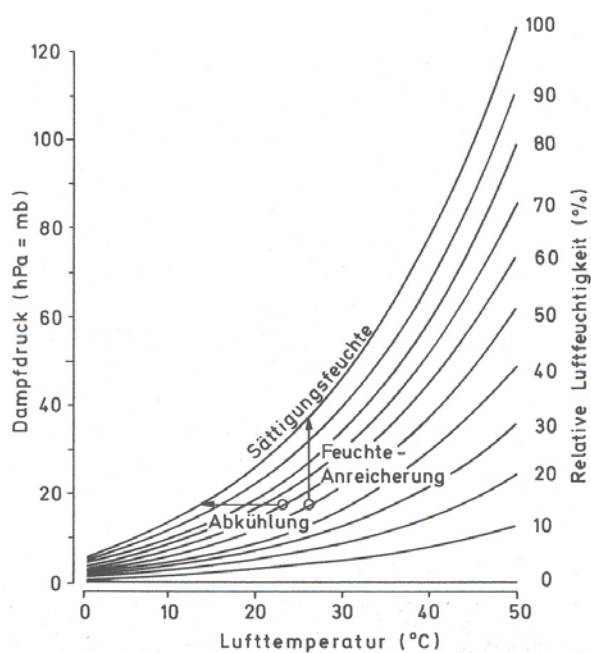


Bild 4.6: Dampfdruck, relative Luftfeuchte und Lufttemperatur [82]

#### 4.2.5 Verdunstung

Verdunstung ist die Bezeichnung für den Übergang eines Stoffes vom flüssigen oder festen Zustand in den gasförmigen Zustand. In dieser Arbeit wird als Verdunstung nur der Phasenübergang von flüssig nach gasförmig aufgrund reiner Oberflächenprozesse verstanden und schließt eine Verdunstung in Folge Siedens mit Blasenbildung aus. Aus der Flüssigkeitsoberfläche entweichen solange Moleküle in den Dampfraum, bis der über der Flüssigkeit befindliche Dampf bei der jeweiligen Verdampfungstemperatur gesättigt ist. Dabei verdampfen Flüssigkeiten mit hoher Oberflächenspannung bei gleicher Temperatur langsamer als solche mit niedriger Oberflächenspannung. Bei diesem Prozeß wird der Flüssigkeit thermische Energie in Form von Verdampfungswärme entzogen. Die mittlere Teilchengeschwindigkeit der verbleibenden Moleküle sinkt dabei ab, so daß sich die Flüssigkeit entsprechend abkühlt.

Das Verdunstungsverhalten von realen Flüssigkeiten hängt von vielen Parametern ab und läßt sich bisher kaum theoretisch berechnen [85]. Daher werden zur Charakterisierung der Verdunstungsgeschwindigkeit empirisch ermittelte Maßzahlen, z.B. die Verdunstungszahl bei Lösungsmitteln und der Verdunstungskoeffizient für Riechstoffe und etherischen Ölen herangezogen [85].

Die Verdunstungszahl, anwendbar auf Wasser, ist ein Maß für die Flüchtigkeit von Flüssigkeiten. Die Verdunstungszahl ist definiert als Quotient aus der Verdunstungszeit der prüfenden Flüssigkeit und der Verdunstungszeit von Diethylether als Vergleichsflüssigkeit. Die Verdunstungszahl wird bei einer Temperatur von  $\vartheta = 293 \pm 2 \text{ K}$  und einer relativen Luftfeuchte von  $r.F. = 65 \% \pm 5 \%$  ermittelt [85]. Eine weitere Kenngröße für die Beurteilung des Verdunstungsverhaltens bietet der Dampfdruck. In Tabelle 4.2 [85] sind die Verdunstungszahlen für verschiedene Flüssigkeiten aufgelistet. Flüssigkeiten mit hohen Verdunstungszahlen verdunsten langsamer als diejenigen mit niedrigen Verdunstungszahlen.

Tabelle 4.2: Verdunstungszahlen für verschiedene Flüssigkeiten [85]

Flüssigkeit	Verdunstungszahl
Aceton	2,1
Dichlormethan	1,8
Ethanol	8,3
Wasser	ca. 80
Decalin	95

#### 4.2.6 Kondensation

Kondensation ist der Übergang eines Stoffes aus dem gasförmigen in den flüssigen oder bei sublimierenden Stoffen in den festen Zustand beim Überschreiten der Sättigungsdichte seines Dampfes infolge Abkühlung oder Druckerhöhung. Beim Einstoffsystem tritt die Kondensation am sogenannten Kondensationspunkt ein, der mit dem Siedepunkt bzw. Sublimationspunkt der betreffenden Substanz identisch ist. Dem Kondensationspunkt entspricht in Mehrstoffsystemen der Taupunkt. Die Kondensation wird erleichtert durch die Anwesenheit von Staubteilchen und Ionen, die als Kondensationskerne wirken [85].

Die Sättigungsfeuchte der Luft hängt stark von der Lufttemperatur ab. Je höher die Temperatur, desto mehr Wasserdampf kann aufgenommen werden. Wird die Luft abgekühlt, ist mehr Wasserdampf enthalten, als die Luft aufnehmen kann. Der überschüssige Wasserdampf kondensiert.

### 4.3 Wassermengen der Erde

#### 4.3.1 Wasserkreislauf

Der Wasserkreislauf beschreibt den Weg des Wassers, das vom Meer oder von freien Oberflächen über die Verdunstung in die Luft gelangt und dann zurück zur Erde fällt. Nach der Verdunstung kommt es durch die Ansammlung winziger Wassertröpfchen zur Wolkenbildung. Bei Erreichen einer kritischen Masse der Tropfen fallen diese dann als Niederschlag wieder zur Erde zurück. Wie in Bild 4.7 [82] verdeutlicht, stellt der Wasserkreislauf eine Folge von Transport- und Speicherprozessen in den verschiedenen Phasen des Wassers dar.

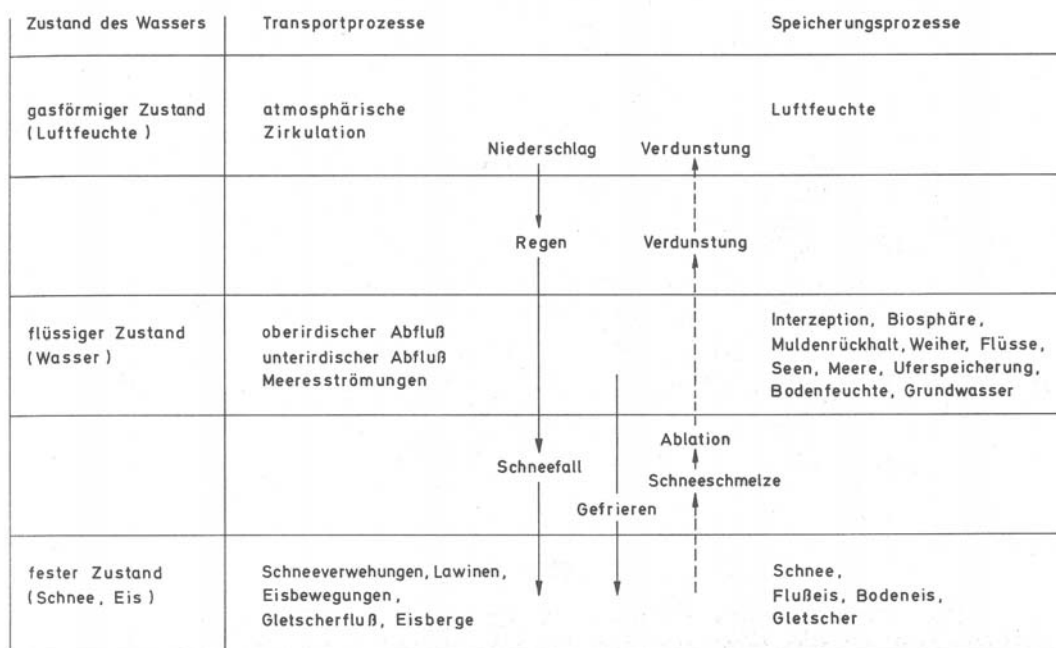


Bild 4.7: Schema des Wasserkreislaufes [82]

Zu den vorhandenen Wassermengen der Erde werden von verschiedenen Autoren z.B. [89], [90], [91], [92] unterschiedliche Daten angegeben. Die Angaben unterscheiden sich im Wasservolumen des Weltmeeres und des Grundwassers erheblich. Um hier nur eine Größenordnung zu geben, wurden aus [90] Werte entnommen und in Tabelle 4.3 zusammengestellt.

Tabelle 4.3: Wassermengen der Erde [90]

	Wassermenge km <sup>3</sup>	Anteil in %
Gesamt	1 385 984 610	100
davon Salzwasser (Meer)	1 338 000 000	96,54
davon Süßwasser (gesamt)	35 029 210	3,46
Aufteilung des Süßwassers in:		
Eis und Schnee	24 364 100	1,76
Grundwasser	23 400 000	1,69
Oberflächenwasser (Flüsse, Seen, Moore)	189 990	0,013
Bodenfeuchte	16 500	0,001
Atmosphäre	12 900	0,001
Organismen	1 120	0,001

#### 4.3.2 Verweilzeiten des Wassers

In den jährlichen Kreislauf des Wassers sind rund 500 000 km<sup>3</sup> Meerwasser einbezogen. Dies sind 0,04 % des Meerwasservolumens, d.h. die mittlere Verweilzeit des Meerwassers in den Ozeanen beträgt etwa 3000 Jahre [82]. In Tabelle 4.4 sind nach [82] die mittleren Verweilzeiten des Wassers für verschiedene Vorratsspeicher angegeben.

Tabelle 4.4: Mittlere Verweilzeiten des Wassers [82]

Vorratsspeicher	mittlere Verweilzeit t
verdunstetes Regenwasser	Sekunden bis Minuten
biologisches Wasser	1 Tag
Atmosphäre	9 Tage
Flüsse	16 Tage
Bodenfeuchte	1 Jahr
Moore, Sümpfe	5 Jahre
Seen	17 Jahre
Oberflächengrundwasser	1400 Jahre
Gebirgsgletscher	1600 Jahre
Weltmeer	3150 Jahre
Polareis	9700 Jahre
Permafrost, Bodeneis	10000 Jahre

## 4.4 Inhaltsstoffe und Leitfähigkeiten von Wasser

### 4.4.1 Klassifikationen des Wassers

Nach der Definition in [93] wird für die Klassifikation von Wasser die Gesamtkonzentration gelöster Inhaltsstoffe herangezogen. Hierbei enthält Süßwasser bis zu einem Gramm gelöste feste Bestandteile pro Kilogramm Wasser, während Meerwasser bis zu 100 Gramm gelöste Bestandteile enthalten kann. Tabelle 4.5 gibt zur Klassifikation des Wassers einen Überblick.

Tabelle 4.5: Klassifikation von Wasser [93]

Bezeichnung des Wassers	Konzentration an gelösten festen Bestandteilen in g pro kg Wasser
Süßwasser	0 – 1
Brackwasser	1 – 10
Salzwasser	10 – 100
Sole	> 100

### 4.4.2 Inhaltsstoffe im Regenwasser

Wasser stellt für viele Stoffe, insbesondere für Ionen, ein sehr gutes Lösungsmittel dar. Aus diesem Grund sind im Regenwasser überwiegend aus der Atmosphäre aufgenommene ionische Komponenten als Fremdstoffe zu finden, was sich auf die Leitfähigkeit des Regenwassers direkt auswirkt.

Über die chemische Zusammensetzung von Regenwasser existieren zahlreiche Untersuchungen mit zum Teil unterschiedlichen Ergebnissen, da sowohl die Konzentration als auch die Art der Inhaltsstoffe von vielfältigen Einflüssen abhängt. Im Regenwasser können eine Vielzahl von Spurenstoffen, hauptsächlich gelöste Ionen, aber auch unlösliche Schwebeteilchen, enthalten sein, wobei die Art der Inhaltsstoffe hauptsächlich von der Wetterlage und dem Ort der Messung beeinflusst wird. Die am häufigsten vorkommenden ionischen Komponenten im Regenwasser sind Chlorid, Nitrat, Sulfat, Natrium und Ammonium.



Die Konzentration von gelösten Fremdstoffen im Regenwasser liegt im Spuren- und Ultraspurenbereich, d.h. bei mg/l bzw. µg/l, und hängt von der Stoffkonzentration in der Luft und von der Aufnahmeeffektivität durch den Regen ab. Die Aufnahme kann unter anderem durch Diffusion, Lösung oder Hydrolyse erfolgen. In diesem Zusammenhang ist die Tropfengröße von Bedeutung, da die Reaktionswahrscheinlichkeit proportional mit der Oberfläche zunimmt.

Es sind zwei unterschiedliche Mechanismen bekannt, durch die Fremdstoffe aus der Atmosphäre im Regen gelöst und transportiert werden. Beim „Rainout“ werden die Stoffe in der Wolke, beim „Washout“ werden die Stoffe unterhalb der Wolke aufgenommen. Durch das Verhältnis zwischen beiden Mechanismen wird einerseits die Abhängigkeit der Stoffkonzentration von lokalen Einflüssen bestimmt und andererseits eine Änderung der Stoffkonzentration während ein und desselben Niederschlagsereignisses hervorgerufen. Der Washout-Anteil gewinnt in stärker belasteten Gebieten, wie z.B. maritimen oder industriellen Regionen, durch die größere Stoffkonzentration in der Luft an Bedeutung. Der Rainout-Anteil wird hiervon kaum beeinflusst, sondern hängt vielmehr von der Herkunft der Luftmassen ab.

Bei einem einzelnen Niederschlagsereignis ändert sich die chemische Zusammensetzung der zeitlich aufeinanderfolgend genommenen Regenproben. Zu Beginn von Niederschlägen ist eine höhere Stoffkonzentration zu verzeichnen, die mit der Zeit abnimmt und dann einen konstanten Wert beibehält. Die Konzentrationsabnahme ist durch den Effekt des Washout zu erklären, da sich die bodennahe Luft mit zunehmender Regendauer immer weiter reinigt, während der konstante Wert auf Rainout-Effekt zurückzuführen ist. Es unterscheiden sich die Konzentrationen der gelösten Inhaltsstoffe des Regens von frei gesammeltem Niederschlag und von einem unter Bäumen gefangenen Niederschlag. Beim gesammelten Niederschlag unter Bäumen nimmt das Wasser weitere abgelagerte Substanzen der Pflanzen auf, was sich in einer Änderung des pH-Wertes bemerkbar macht. [94]

#### 4.4.3 Inhaltsstoffe im Meerwasser

Der mittlere Salzgehalt des Meerwassers beträgt 35 ‰. Im offenen Weltmeer schwankt der Salzgehalt zwischen 32 ‰ und 38 ‰. Im Roten Meer steigt der Salzgehalt bis 41 ‰, während in der Nähe von Flußmündungen dieser gegen 0 ‰ strebt [95]. In Tabelle 4.6 sind die gelösten Salze im Meerwasser nach [95] zusammengestellt. Tabelle 4.7 gibt die Konzentration der gelösten Inhaltsstoffe für Meerwasser mit einem Salzgehalt von 35 ‰ in Gramm gelöster Stoffe pro Kilogramm Wasser an [83].

Tabelle 4.6: Gelöste Salze im Meerwasser [95]

Komponente	Chemische Bezeichnung	Anteil in %
Natriumchlorid	NaCl	77,758
Magnesiumchlorid	MgCl <sub>2</sub>	10,878
Magnesiumsulfat	MgSO <sub>4</sub>	4,737
Kalziumsulfat	CaSO <sub>4</sub>	3,600
Kaliumsulfat	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,465
Kalziumkarbonat	CaCO <sub>3</sub>	0,345
Magnesiumbromid	MgBr <sub>2</sub>	0,217

Tabelle 4.7: Meerwasser mit einem Salzgehalt von 35 ‰ [83].

Inhaltsstoff	Konzentration in g pro kg Wasser
Na <sup>+</sup>	10,760
K <sup>+</sup>	0,387
Ca <sup>2+</sup>	0,413
Mg <sup>2+</sup>	1,294
Sr <sup>2+</sup>	8,008
Cl <sup>-</sup>	19,353
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,712
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,142
Br <sup>-</sup>	0,067
F <sup>-</sup>	0,001
B	0,004

#### 4.4.4 Leitfähigkeiten

Die spezifische elektrische Leitfähigkeit einer wäßrigen Lösung eines oder mehrerer Salze setzt sich aus der Summe der Leitfähigkeiten der einzelnen Kationen und Anionen zusammen. Die Leitfähigkeit wird durch die Beweglichkeit der gelösten Ionen hervorgerufen. Die Beweglichkeiten der Ionen steigen mit zunehmender Temperatur bzw. fallen mit sinkender Temperatur im Durchschnitt um 2% pro 1° C [83]. In Tabelle 4.8 nach [83] werden für Regenwasser, süßes Grundwasser und Meerwasser die spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten gegeben.

Tabelle 4.8: Spezifische elektrische Leitfähigkeiten des Wassers [83]

Art des Wassers	Spezifische elektrische Leitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$
Regenwasser	5 – 30
süßes Grundwasser	30 – 2000
Meerwasser	45000 – 55000

## 4.5 Niederschlag

### 4.5.1 Definition des Niederschlags

Niederschlag ist Wasser der Atmosphäre, das nach Kondensation oder Sublimation von Wasserdampf in der Lufthülle ausgeschieden wurde und sich infolge der Schwerkraft entweder zur Erdoberfläche bewegt (fallender Niederschlag) oder zur Erdoberfläche gelangt ist (abgesetzter Niederschlag). Im folgenden wird ein Überblick nach [82] zur Einteilung der fallenden und abgesetzten Niederschlagsarten gegeben.

### 4.5.2 Fallender Niederschlag

Fallende Niederschläge entstehen in der Atmosphäre durch mittelbare Kondensation oder Sublimation. Es sind Niederschläge, die direkt aus den Wolken entstehen. Tabelle 4.9 faßt die fallenden Niederschlagsarten zusammen [82].

Tabelle 4.9: Fallender Niederschlag [82]

Aggregatzustand	Art des Niederschlags	Niederschlagsdurchmesser
• Flüssige Formen	Sprühregen = Nieseln	$d = 2 - 5 \text{ mm}$
	Regen	$d > 0,5 \text{ mm}$
• Feste Formen	Schnee	keine Angabe
	Reifgraupel	$d \cong 2 - 5 \text{ mm}$
	Frostgraupel	$d = 2 - 5 \text{ mm}$
	Griesel	$d < 1 \text{ mm}$
	Hagel, Eiskugeln, Eisstücke	$d = 5 - 10 \text{ mm}$ oder größer
	Eiskörnchen	$d = 1 - 4 \text{ mm}$
	Eisnadeln	keine Angabe, Eiskristalle

### 4.5.3 Abgesetzter Niederschlag

Der abgesetzte Niederschlag entsteht unmittelbar an der Erdoberfläche oder an Gegenständen durch Kondensation oder Sublimation des Wasserdampfes. Die Arten des abgesetzten Niederschlages mit seinen Aggregatzuständen und dessen Besonderheiten sind in Tabelle 4.10 zusammengefaßt.

Tabelle 4.10: Abgesetzter Niederschlag [82]

Aggregatzustand	Art des Niederschlags	Besonderheiten
• Flüssige Formen	Tau	Wassertröpfchen, die durch Kondensation vorwiegend an horizontalen Oberflächen gebildet werden.
	Taubeschlag	Wassertröpfchen, die durch Kondensation vorwiegend an vertikalen Flächen gebildet werden.
• Feste Formen	Reif	Eiskristalle, die durch Sublimation vorwiegend an horizontalen Oberflächen gebildet werden.
	Frostbeschlag	Eiskristalle, die durch Sublimation vorwiegend an vertikalen Flächen gebildet werden.

### 4.5.4 Größe von Regentropfen

Regen ist ein sehr variabler atmosphärischer Parameter. Viele seiner Kenngrößen hängen jedoch von der Tropfengröße ab, die üblicherweise anhand des Tropfendurchmessers  $d$  beschrieben wird. Niederschlag bildet sich erst, wenn Tropfen eine Größe erreichen, die es ihnen ermöglichen, gegen die in den Wolken herrschende Aufwinde mit Geschwindigkeiten von etwa  $v \approx 20 \text{ cm/s}$  bis über  $v \approx 20 \text{ m/s}$ , je nach Wolkentyp, zu fallen [82]. Tabelle 4.11 [82] zeigt die Abhängigkeit der Fallgeschwindigkeit der Wassertropfen vom Tropfendurchmesser.

Tabelle 4.11: Abhängigkeit der Fallgeschwindigkeit vom Durchmesser der Regentropfen [82]

Tropfendurchmesser d in m	Fallgeschwindigkeit v in m/s
$2 \cdot 10^{-6}$	$0,12 \cdot 10^{-3}$
$20 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-3}$
$0,2 \cdot 10^{-3}$	0,72
$2 \cdot 10^{-3}$	6,5
$6 \cdot 10^{-3}$	9,2

Die Distanz, die ein Tropfen außerhalb der Wolken in ungesättigter Luft fallen kann, hängt von seiner Größe ab. In einer Luftmasse von 90 % relativer Feuchte fällt ein Tropfen von  $d = 20 \mu\text{m}$  nur 3 cm bis er verdunstet. Ein Tropfen von  $d = 200 \mu\text{m}$  fällt unter gleichen Bedingungen hingegen 150 m. Da bei einem Landregen die unteren Wolkengrenzen einige hundert Meter über dem Boden liegen, wird der Durchmesser von  $d = 200 \mu\text{m}$  als die Mindestgröße für einen Tropfen angesehen, der auf der Erdoberfläche ankommen kann. Typische Regentropfen haben jedoch einen Durchmesser von etwa  $d = 1 \text{ mm}$  bis  $d = 4 \text{ mm}$  [82]. Tabelle 4.12 gibt eine Übersicht über den Bereich der vorkommenden Durchmesser von Regentropfen. Dabei wurden die Tropfenvolumina unter der Annahme einer kugelförmigen Tropfenform berechnet.

Tabelle 4.12: Größe von Regentropfen auf der Erdoberfläche

Art der Regentropfen	Durchmesser d in mm	Volumen V in $\mu\text{l}$
Kleiner Regentropfen	0,1	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Typische Regentropfen	1	0,5
	3	14,2
	4	33,5
Großer Regentropfen	6	113,1

#### 4.6 Die Relevanz des Wassers bei Alterungsuntersuchungen

Standardisierte Prüfverfahren sollen einen weltweiten Vergleich von Laboruntersuchungen und deren Meßergebnisse ermöglichen. Bei Alterungsuntersuchungen, die mit Feuchte arbeiten, spielen die Eigenschaften des Wassers eine entscheidende Rolle. Bei nicht-standardisierten Prüfmethoden ist es um so wichtiger, genaue Angaben über das verwendete Wasser zu geben. In der Literatur werden auch Laboruntersuchungen mit Wasser der öffentlichen Versorgung beschrieben, dessen Inhaltsstoffe örtlich sehr unterschiedlich sein können. Ein solches Alterungsverfahren eignet sich nicht für einen weltweiten Vergleich, da es nicht reproduzierbar ist.

Gerade bei Untersuchungen zur beschleunigten Alterung von Isolierwerkstoffen im Labor bestimmt die Art des verwendeten Wassers und dessen Ionen das Ergebnis. In [96] wird der Einfluß von Ionen auf das Alterungsverhalten polymerer Isolierwerkstoffe untersucht. Bei den experimentellen Untersuchungen in einem Alterungsverfahren nach dem Radtest über 500 Stunden Versuchsdauer wird der Einfluß verschiedener ionenhaltiger Lösungen herausgearbeitet. Als Referenz der Untersuchungen wird eine Natriumchloridlösung mit einem pH-Wert von 7 verwendet. Alle untersuchten Prüflösungen weisen eine Volumenleitfähigkeit von 265 bis 285  $\mu\text{S}/\text{cm}$  auf und unterscheiden sich in den zugegebenen Ionen im destillierten Wasser als Prüflösung. Eine Prüflösung hat ebenfalls einen pH-Wert von 7 mit unterschiedlichen Ionen im Vergleich zur Referenzlösung. Eine weitere Prüflösung bildet den sauren Charakter des Regens nach. Bei den Untersuchungen werden auch Ionen, wie H, Mg, Na, Ca,  $\text{NH}_4$ , K, Cl,  $\text{SO}_4$  und  $\text{NO}_3$ , berücksichtigt, die in küstenfernen Gebieten vorherrschen. Als Ergebnis der Untersuchungen ist eine Mechanismenänderung in der Alterung des polymeren Isolierwerkstoffes festzustellen. Als Schlußfolgerung wird vorgeschlagen, Untersuchungen küstenferner Bedingungen weiter zu vertiefen, da diese für einen Großteil der installierten Betriebsmittel im elektrischen Energieversorgungsnetz relevant sind.

Bei standardisierten Verfahren wird oft mit Natriumchlorid-Ionen gearbeitet, die im Wasser eine definierte spezifische Volumenleitfähigkeit generieren. Diese Art der Ionen berücksichtigt die in Küstennähe vorherrschenden Umgebungsbedingungen. In weiter Entfernung von Küstengebieten ist die Konzentration im atmosphärischen

Niederschlag dagegen völlig verschieden, und andere Ionen sind vorherrschend. In Tabelle 4.13 [83] wird ein Überblick zur Konzentration der Natrium- und Chlorionen in Abhängigkeit der Entfernung zum Meer für eine Untersuchungsreihe in Deutschland gegeben. Auch hängt die Konzentration dieser Ionen von der Windstärke ab. Der Vergleich der Windstärkenbereiche von Windstille bis  $v = 2,4 \text{ m/s}$  mit Windstärken über  $7,7 \text{ m/s}$  zeigt eine Verdopplung des Natriumgehaltes bei höheren Windstärken im Umkreis des Küstengebietes bis 75 Kilometer Entfernung [83].

Tabelle 4.13: Natrium- und Chlorgehalt des Regenwassers in Abhängigkeit von der Entfernung zum Meer [83]

Entfernung in km	Na <sup>+</sup> in mg/l	Cl <sup>-</sup> in mg/l
0,2	22	49
50	2,5	4,8
450	0,8	2,2
800	0,4	0,9
950	0,2	0,6
1250	0,2	0,5

In den vorhergehenden Abschnitten wurde eine detaillierte Zusammenstellung betreffend die verschiedenen Formen und möglichen Inhaltsstoffen des Wassers gegeben. Mit der Angabe von Kennwerten des Wassers soll veranschaulicht werden, von welchen Faktoren und Umgebungsbedingungen die Eigenschaften des atmosphärischen Wassers abhängen. Bei Alterungsuntersuchungen von Isolierwerkstoffen im Labor werden diese realen Verhältnisse entsprechend der Parameter in ihrer Vielfalt kaum berücksichtigt. Es ist daher bei Prüfverfahren, die reale Bedingungen im Labor nachbilden sollen, sehr wichtig, genaue Angaben zu den Eigenschaften des verwendeten Wassers zu machen, da sonst eine Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse nicht gewährleistet werden kann. Aus den Angaben der Inhaltstoffe und der Volumenleitfähigkeiten des Wassers kann geschlossen werden, welche realen Bedingungen im Labor jeweils nachgebildet werden.



## 4.7 Hydrophobie

### 4.7.1 Ein Tropfen auf einer Isolierstoffoberfläche

Bei Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik spielen feuchte Beläge auf Isolierstoffoberflächen eine entscheidende Rolle für das Betriebsverhalten. Die feuchten Beläge kommen bei Innenraumanwendungen typischerweise durch Kondensation und bei Freiluftanwendungen durch Niederschlag oder Kondensation zustande. In Abhängigkeit der Hydrophobieeigenschaften des Isolierstoffes bilden sich die feuchten Beläge als singuläre Tropfen oder als zusammenhängende Flüssigkeitsfilme aus.

Eine Flüssigkeit auf einer festen Isolierstoffoberfläche ist bestrebt, eine Minimalfläche anzunehmen. Bei frei schwebenden Tropfen entspricht dies der Kugelform. Bei der Anwesenheit einer Flüssigkeit auf einem Feststoff bilden sich Grenzflächen aus, und es entsteht eine Beziehung zwischen den Phasen Feststoff, Flüssigkeit und Gas. Auf den Tropfen wirken an der Grenzfläche zwischen den jeweiligen Phasen Grenzflächenkräfte, die für charakteristische Erscheinungen, wie die der Hydrophobieeigenschaft und der Verdunstung, verantwortlich sind. Bild 4.8 zeigt die Dreiphasenbeziehung eines Tropfens auf einer Feststoffoberfläche.

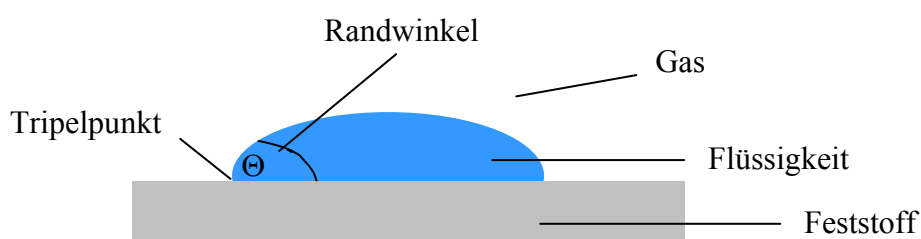


Bild 4.8: Ein Flüssigkeitstropfen auf einer Feststoffoberfläche

Der Ort des Zusammentreffens aller drei Phasen wird als Tripelpunkt bezeichnet. In der zweidimensionalen Profilsansicht eines Tropfens ist dies der jeweils rechte und linke Eckpunkt der Tropfenbegrenzungslinie. Am Tripelpunkt ist der Randwinkel  $\Theta$  definiert, der auch äquivalent als Kontaktwinkel oder Benetzungswinkel bezeichnet wird. Aus diesem können intermolekulare Kräfte zwischen den drei Phasen abgeleitet werden.

Es sollen zunächst die Begriffe „Grenzfläche“ und „Oberfläche“ erklärt werden. Eine Grenzfläche ist die Phasengrenze zwischen zwei kondensierenden Phasen, d.h. zwischen Flüssigkeit und Festkörper. Als „Oberfläche“ wird die Phasengrenze zwischen einer kondensierenden und einer nichtkondensierenden Phase bezeichnet. Dies sind die Phasengrenzen zwischen Flüssigkeit und Gas und zwischen Festkörper und Gas. Der Begriff Oberfläche wird hier so verstanden, obwohl dieser eigentlich nur verwendet wird, wenn die entsprechende Phase an Vakuum grenzt. In Bild 4.8 ist somit die Begrenzung der Flüssigkeit und die des Feststoffes jeweils gegen den Gasraum eine Oberfläche, während die Kontaktfläche des Flüssigkeitstropfens mit dem Feststoff eine Grenzfläche darstellt.

Die Oberflächenspannung ist eine Folge der gegenseitigen Anziehung der Flüssigkeitsmoleküle, die an der Oberfläche, an der gleichartige Nachbarn nur auf einer Seite existieren, als Resultierende eine in das Innere der Flüssigkeit gerichtete Kraft liefert. Die Oberflächenspannung  $\gamma$  ist definiert als Quotient aus der zur Dehnung der Oberfläche notwendigen Kraft  $\Delta F$  und der Länge der Randlinie  $\Delta l$ .

$$\gamma = \frac{\Delta F}{\Delta l} \quad (4.1)$$

Die Oberflächenspannung ist bei reinen Flüssigkeiten um so größer, je stärker die zwischenmolekularen Kohäsionskräfte sind und nimmt mit zunehmender Temperatur ab, da sich die Abstände zwischen den Molekülen vergrößern und somit die Kräfte zwischen den einzelnen Molekülen geringer werden. Der Begriff Grenzflächenspannung gilt entsprechend für das Zusammenwirken zweier nichtkondensierter Phasen.

#### 4.7.2 Definition des Randwinkels

Der Randwinkel  $\Theta$  ist der beim Kontakt einer Flüssigkeit mit einem Festkörper sich an der Dreiphasengrenze ausbildender Winkel, wie in Bild 4.9 dargestellt. Dieser kann im Tropfenprofil an den beiden Tripelpunkten gemessen werden.

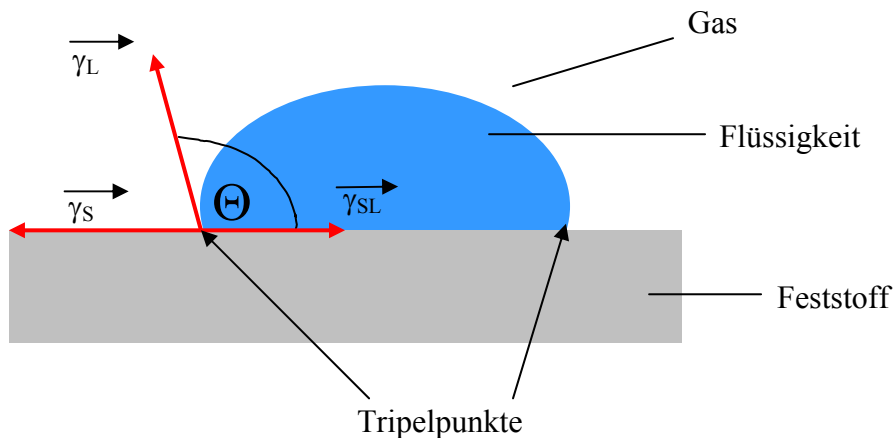


Bild 4.9: Ein Flüssigkeitstropfen auf einer Feststoffoberfläche

Im Kräftegleichgewicht eines auf einer festen Oberfläche liegenden Tropfens gilt die Young-Gleichung. Diese Gleichung stellt eine Beziehung auf zwischen den vier Parametern Oberflächenspannung des Festkörpers  $\gamma_s$ , Oberflächenspannung der Flüssigkeit  $\gamma_L$ , Grenzflächenspannung  $\gamma_{SL}$  zwischen Flüssigkeit und Festkörper und dem Randwinkel  $\Theta$ .

$$\gamma_s - \gamma_{SL} = \gamma_L \cdot \cos \Theta \quad (4.2)$$

Die Young-Gleichung setzt folgende Bedingungen voraus:

- Die Gravitationskraft wird vernachlässigt [97].
- Die Festkörperoberfläche wird nicht durch den Flüssigkeitstropfen deformiert.
- Die Festkörperoberfläche ist ideal (keine Rauigkeit, keine Inhomogenitäten, keine Flüssigkeitsaufnahme).
- Der Randwinkel ist unabhängig vom Volumen [98].

Es werden zwei Bereiche bezüglich des Randwinkels unterschieden. Ist der Randwinkel  $\Theta < 90^\circ$ , so liegt definitionsgemäß Benetzung vor, im zweiten Fall wenn der Randwinkel  $\Theta > 90^\circ$ , liegt Nichtbenetzung vor. Der maximale Wert des

Randwinkels kann theoretisch  $\Theta = 180^\circ$  erreichen. In Realität hat dieser jedoch immer einen Wert unter  $180^\circ$ . Dies weist darauf hin, daß immer Adhäsionskräfte zwischen einem Flüssigkeitsvolumen und einem Festkörper existieren.

Die Adhäsionsarbeit ist definiert:

$$W_{\text{ad}} = \gamma_{\text{S}} + \gamma_{\text{L}} - \gamma_{\text{SL}} \quad (4.3)$$

Die Kohäsionsarbeit ist definiert:

$$W_{\text{C}} = 2 \cdot \gamma_{\text{L}} \quad (4.4)$$

Beim Kontakt einer Flüssigkeit und eines Festkörpers konkurrieren die beiden Oberflächenspannungen und die Grenzflächenspannung miteinander. Sie streben jeweils ein Minimum an. Die Form der Flüssigkeit hängt von den in der Young-Gleichung beschriebenen Größen ab. Der Spreitungskoeffizient  $S$  ermöglicht eine Aussage über das Benetzungsverhalten und ist wie folgt definiert:

$$S = \gamma_{\text{S}} - (\gamma_{\text{SL}} + \gamma_{\text{L}}) \quad (4.5)$$

Bedingung für Spreitung:  $S > 0$

Bedingung für Nichtspreitung:  $S \leq 0$

Spreitung tritt immer dann ein, wenn die Benetzungsspannung größer als die Oberflächenspannung der Flüssigkeit ist, bzw. wenn die Adhäsion zwischen Flüssigkeit und Festkörper größer als die Kohäsion der Flüssigkeit ist.

$$S = W_{\text{ad}} - W_{\text{c}} \quad (4.6)$$

Bei einer vollständigen Benetzung spreitet die Flüssigkeit und bildet einen durchgehenden Flüssigkeitsfilm auf der Feststoffoberfläche aus. Im Fall der unvollständigen Benetzung, d.h. einer Nichtspreitung, entsteht ein Tropfen mit einem endlichen Randwinkel.

#### 4.7.3 Der statische Randwinkel und der dynamische Randwinkel

Es wird zwischen dem statischen und dem dynamischen Randwinkel unterschieden. Der statische Randwinkel wird an einem Tropfen gemessen, der auf einer horizontalen Oberfläche aufgesetzt ist. Wenn keine zusätzlichen Angaben bezüglich des Randwinkels vorliegen, ist im allgemeinen der statische Randwinkel  $\Theta$  gemeint.

Der dynamische Randwinkel wird gemessen, kurz bevor sich die beiden Tripelpunkte des Tropfens auf einer horizontalen Oberfläche bewegen. Dies wird erreicht, wenn ein Tropfen langsam mit Flüssigkeit vergrößert wird. Der sich

einstellende Winkel an den beiden Tripelpunkten ist der Vorrückwinkel  $\Theta_V$ . Beim Absaugen der Flüssigkeit stellt sich an den Tripelpunkten der Rückzugswinkel  $\Theta_R$  ein. Die beiden dynamischen Winkel, Vorrückwinkel  $\Theta_V$  und Rückzugswinkel  $\Theta_R$ , können auch an einer geneigten Festkörperoberfläche gleichzeitig an einem Tropfen gemessen werden. Dabei wird ein Tropfen auf einer schiefen Ebene platziert, ohne daß dieser abgleitet. Der größere Winkel am unteren Tripelpunkt ist der Vorrückwinkel  $\Theta_V$  und der kleinere Winkel am oberen Tripelpunkt der Rückzugswinkel  $\Theta_R$ . Der statische Randwinkel nimmt Werte im Bereich zwischen dem Vorrückwinkel  $\Theta_V$  und Rückzugswinkel  $\Theta_R$  ein.

#### 4.7.4 Die Randwinkelhysterese

Die Differenz zwischen dem Vorrückwinkel  $\Theta_V$  und dem Rückzugswinkel  $\Theta_R$  bei unveränderter Lage der Dreiphasengrenzlinie eines Tropfens wird als Randwinkelhysterese bezeichnet. Folgende Faktoren können Ursache für eine Randwinkelhysterese sein:

- Geometrische Heterogenität, d.h. Rauigkeit  $> 0,5 \mu\text{m}$  [99]
- Energetische, chemische Heterogenität der Festkörperoberfläche im Bereich von  $> 0,1 \mu\text{m}$
- Orientierungseffekte im Feststoff, d.h. Orientierung polarer Gruppen, z.B. bei Polymeren
- Lufteinschluß oder Gaseinschluß zwischen Flüssigkeit und Feststoff
- Verunreinigungen an der Grenzfläche, Adsorptionsschichten [97]

Die Rauigkeit einer Feststoffoberfläche erhöht den Vorrückwinkel  $\Theta_V$  und erniedrigt den Rückzugswinkel  $\Theta_R$ . Häufig ist der Effekt auf den Rückzugswinkel stärker als auf den Vorrückwinkel. Ob eine Randwinkelhysterese auf Rauigkeit oder energetische Inhomogenitäten zurückzuführen ist, läßt sich durch die Randwinkelmessung grundsätzlich nicht entscheiden. Hierfür müssen andere Methoden, z.B. aus der optischen Diagnostik, herangezogen werden. Aus der Praxis ist bekannt, daß extrem hohe Hysteresen mit Randwinkel  $\Theta > 50^\circ$  auf einen deutlichen Rauigkeitseinfluß hinweisen.

#### 4.7.5 Mechanismen der Hydrophobie

An der Grenzfläche zwischen einem Festkörper und einer Flüssigkeit wirken Adhäsionskräfte und Kohäsionskräfte. Während Kohäsionskräfte zwischen Atomen oder Molekülen gleicher Art wirken, ziehen sich unterschiedliche Atome oder Moleküle an Grenzflächen infolge von Adhäsionskräften an. Eine Flüssigkeit kann auf einen Feststoff benetzend oder nichtbenetzend wirken. Im Fall einer Benetzung sind die Adhäsionskräfte größer als die Kohäsionskräfte. Eine Flüssigkeit benetzt einen Festkörper nicht, wenn die Kohäsionskräfte größer als die Adhäsionskräfte sind. Die Benetzung ist eine charakteristische Größe zwischen einem Festkörper und einer Flüssigkeit. Die gleiche Flüssigkeit kann gegenüber einem Festkörper benetzend gegenüber einem anderen Festkörper nichtbenetzend sein, d.h. die Benetzung ist keine charakteristische Eigenschaft einer Flüssigkeit, sondern eine Eigenschaft zwischen einem Festkörper und einer Flüssigkeit. Im Fall von Wasser als Flüssigkeit bezeichnet der Begriff Hydrophobie die Eigenschaft Wasser abzustößen, d.h. eine Benetzung zu verhindern. Als Folge dieser Abstoßung zwischen einer Festkörperoberfläche und Wasser bilden sich singuläre Tropfen, deren Randwinkel charakteristisch für die Benetzungseigenschaften sind. Im nichtbenetzenden Fall entstehen Wasserfilme. Dies wird mit dem Begriff Hydrophilie bezeichnet. Bild 4.10 zeigt einen Tropfen auf einer Isolierstoffoberfläche mit verschiedenen Hydrophobieeigenschaften.

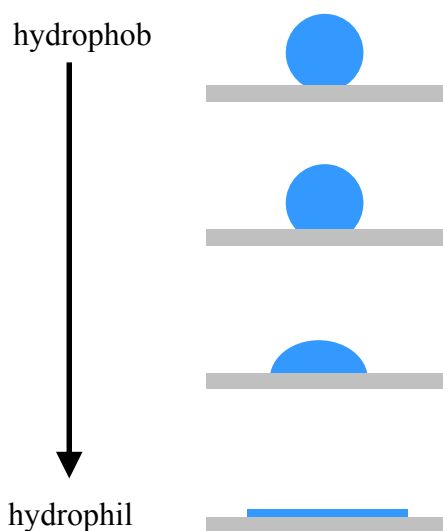


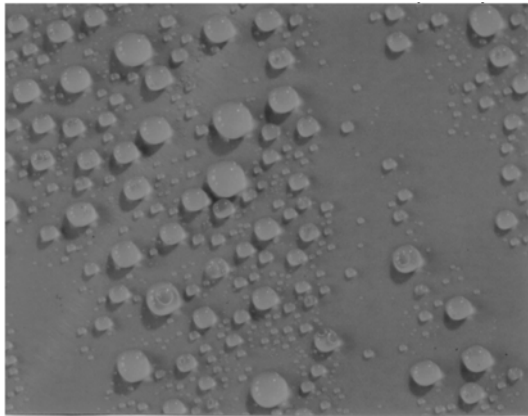
Bild 4.10: Hydrophobieeigenschaften

#### 4.7.6 Bewertung der Hydrophobie

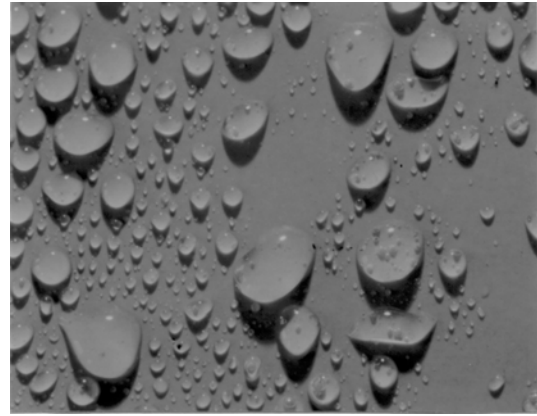
Das Swedish Transmission and Research Institute hat einen Bewertungsmaßstab für die Einordnung der Hydrophobie von Isolierstoffoberflächen geschaffen. Hierbei werden Isolierstoffoberflächen im elektrisch spannungsfreien Zustand begutachtet. In [44] werden sieben Hydrophobieklassen (HC) definiert, um mit Hilfe von Referenzbildern die Isolierstoffoberfläche bewerten zu können. In Bild 4.11 nach [44] sind sechs Klassen gezeigt, wobei die nicht dargestellte Klasse 7 einen kontinuierlichen Wasserfilm auf der gesamten Testfläche beschreibt. In Tabelle 4.14 ist eine Definition der Hydrophobieklassen mit Angaben des Rückzugswinkels  $\theta_R$  gegeben. Über den Neigungswinkel der Testfläche werden keine Angaben gemacht. Als zu verwendendes Wasser wird entionisiertes Wasser empfohlen ohne nähere Angaben zu den Spezifikationen. Bei der praktischen Durchführung des Hydrophobietests wird Wasser in einem Abstand von ca.  $25 \pm 10$  cm ein bis zweimal pro Sekunde für etwa 20 bis 30 Sekunden auf die zu untersuchende Isolierstoffoberfläche gesprüht. Die Testfläche sollte 50 bis 100 cm<sup>2</sup> groß sein. Die Beurteilung der Hydrophobiekategorie anhand des Tropfenbildes sollte innerhalb 10 Sekunden nach dem letzten Sprühen erfolgen, damit die gesprühte Tropfenschicht nicht durch äußere Einflüsse oder abfließende Tropfenschichten verändert wird.

In IEC Entwurf 62073 [100] werden außer dem hier vorgestellten Hydrophobietest nach [44] noch zwei weitere Verfahren zur Beurteilung des Benetzungsverhaltens von Isolierstoffoberflächen vorgeschlagen. Diese beruhen auf der Messung der Randwinkel und der Messung der Oberflächenspannung des Feststoffes.

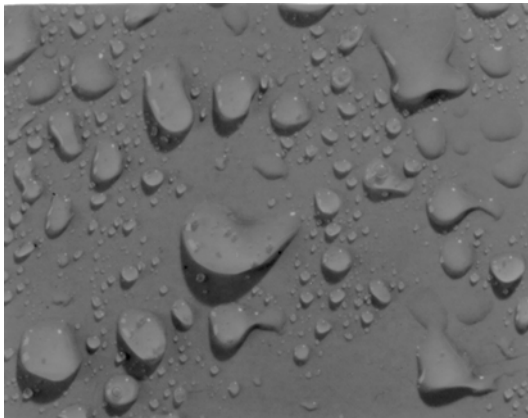
Die Hydrophobieigenschaften von Isolierstoffoberflächen sind für das Betriebsverhalten von elektrischen Betriebsmitteln entscheidend. Durch eine hydrophobe Oberfläche werden durchgehende Flüssigkeitsfilme vermieden, was den Ableitstrom zwischen der Hochspannungselektrode und der Erdelektrode niedrig hält. Somit tragen hydrophobe Isolierstoffoberflächen wesentlich zu einem stabilen Langzeitverhalten des Isolierwerkstoffes bei.



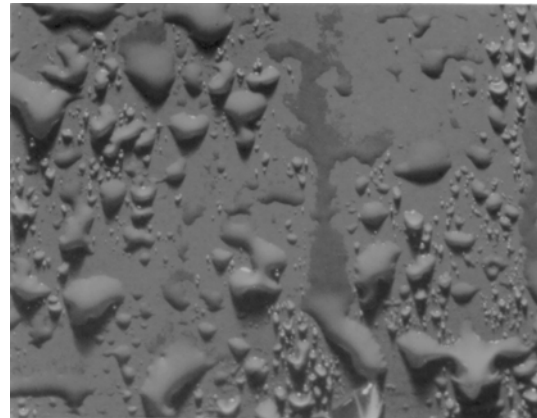
HC 1



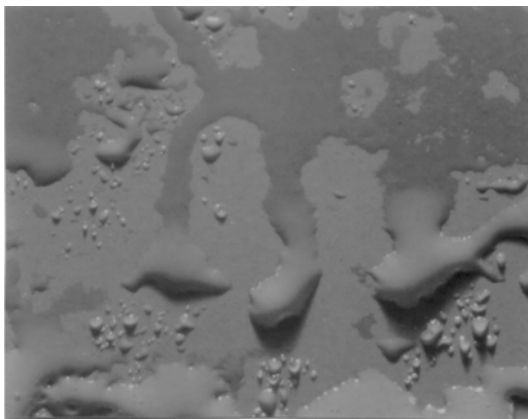
HC 2



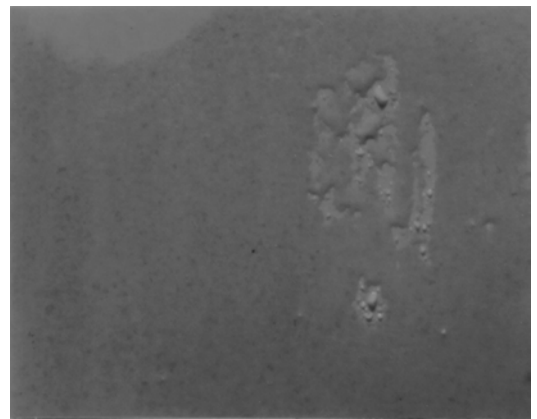
HC 3



HC 4



HC 5



HC 6

Bild 4.11: Definition der Hydrophobieklassen [44]



Tabelle 4.14: Kriterien zur Klassifizierung der Hydrophobie [44]

Hydrophobie- klasse (HC)	Beschreibung
1	Nur diskrete Tropfen formieren sich. $\theta_r \approx 80^\circ$ oder größer für die Mehrheit der Tropfen
2	Nur diskrete Tropfen formieren sich. $50^\circ < \theta_r < 80^\circ$ für die Mehrheit der Tropfen
3	Nur diskrete Tropfen formieren sich. $20^\circ < \theta_r < 50^\circ$ für die Mehrheit der Tropfen. Gewöhnlicherweise sind die Tropfen nicht mehr kreisförmig.
4	Es sind sowohl diskrete als auch feuchte Flächen vorhanden. Vollständig benetzte Flächen $< 2 \text{ cm}^2$ sind vorhanden, zusammen sind diese $< 90\%$ der untersuchten Fläche.
5	Einige vollständig benetzte Flächen $> 2 \text{ cm}^2$ , die insgesamt $90\%$ der gesamten untersuchten Fläche bedecken.
6	Vollständig benetzte Flächen bedecken $> 90\%$ der gesamten untersuchten Fläche, d.h. geringe trockene Flächen sind vorhanden.
7	Kontinuierlicher Wasserfilm auf der gesamten untersuchten Fläche

## 4.8 Der Lotuseffekt

### 4.8.1 Das Prinzip des Lotuseffektes

Der Lotuseffekt, an der asiatischen Lotospflanze erstmals entdeckt, beruht auf einer Nanostruktur der Oberfläche, die eine Selbstreinigung durch abfließendes Wasser ermöglicht. Durch die chemische Zusammensetzung des Materials der Lotospflanze wirkt diese hydrophob, was durch die mikroporöse Oberflächenstruktur mit regelmäßigen Erhöhungen in der Größe von wenigen Mikrometer noch wesentlich verstärkt wird. Im Bild 4.12 ist die Oberflächenstruktur eines Blattes der Lotospflanze zu sehen. Der Maßstab unten rechts in Bild 4.12 entspricht 20  $\mu\text{m}$ .

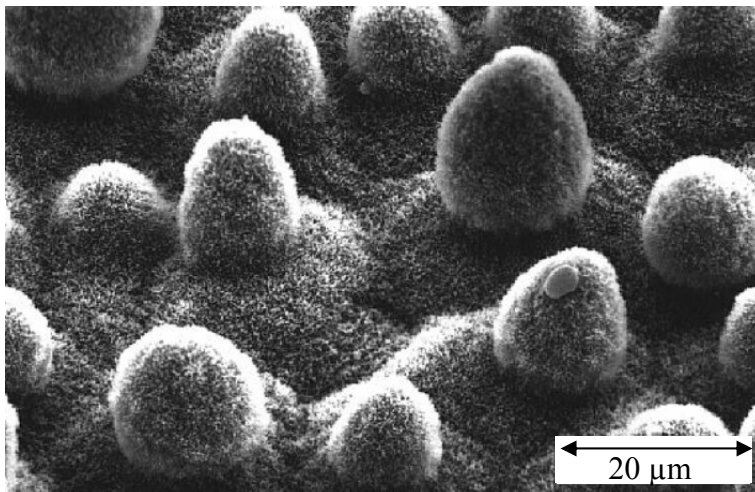


Bild 4.12: Mikroporöse Oberflächenstruktur eines Blatts der Lotusblume [101]

Das Verhalten von Wasser auf einer Oberfläche hängt sehr stark von der Rauigkeit der Oberfläche ab. Ist eine glatte Oberfläche relativ gut benetzbar, dann wird die Benetzbarkeit durch Aufrauung noch weiter verbessert. Ist eine glatte Oberfläche hydrophob und damit schlecht benetzbar, dann führt eine Aufrauung zu „Superhydrophobie“, d.h. zu extremer Wasserabstoßung. In diesem Fall wird zwischen der Mikrostruktur und dem Wassertropfen Luft eingeschlossen, da Wassertropfen im allgemeinen größer als die Nanostrukturen sind. Der Tropfen dringt nicht in die Vertiefungen vor, sondern sitzt vielmehr auf den Erhöhungen der Nanostruktur. In Bild 4.13 ist ein solcher aufsitzender Tropfen gezeigt. Der Maßstab

unten rechts im Bild entspricht  $20\text{ }\mu\text{m}$ . Durch die Rauigkeit der Oberfläche wird die Kontaktfläche zwischen dem Festkörper und dem Wassertropfen extrem minimiert, wodurch eine stark verringerte Adhäsion zwischen Wassertropfen und Festkörper eintritt. Dies führt aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers zu einem kugelförmigen Tropfen, der bei geringsten Neigungswinkeln rückstandsfrei und scheinbar reibungslos abrollt.

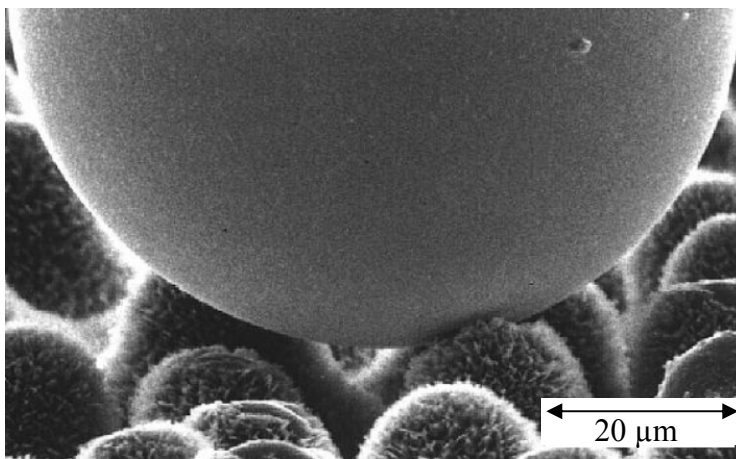


Bild 4.13: Tropfen auf einer Oberfläche mit Lotuseffekt [101]

Oberflächen mit Lotuseffekt sind nahezu unverschmutzbar, da die Schmutzpartikel ebenfalls zur Feststoffoberfläche mit Lotuseffekt eine minimierte Kontaktfläche haben. Aus diesem Grund sind die Adhäsionskräfte zwischen einem Wassertropfen und einem Schmutzpartikel größer als die Adhäsionskräfte zwischen der Feststoffoberfläche und dem Schmutzpartikel. So bleibt der Schmutzpartikel an dem Wassertropfen haften und rollt mit diesem zusammen ab. Dies ist auf der linken Seite des Bildes 4.14 angedeutet. Im Gegensatz hierzu werden auf glatten hydrophoben Oberflächen die meisten Schmutzpartikel von Tropfen verdrängt und wieder abgelagert, jedoch kaum von der Oberfläche entfernt, wie Bild 4.14 auf der rechten Seite zeigt.

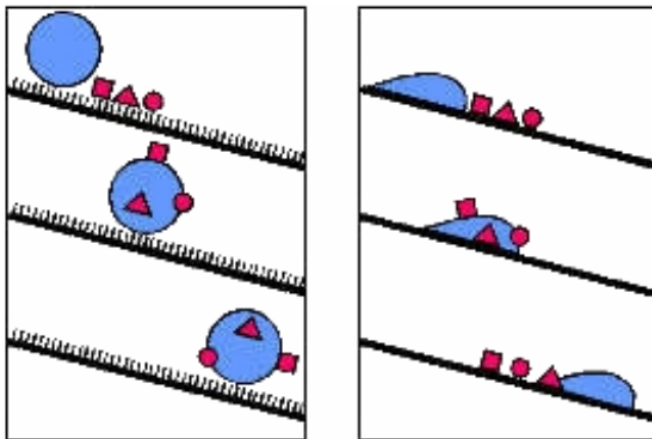


Bild 4.14: links: Schmutzpartikel auf einer Oberfläche mit Lotuseffekt  
rechts: Schmutzpartikel auf einer glatten hydrophoben Oberfläche [102]

#### 4.8.2 Fertigungstechnologien einer Nanostruktur

Die in der Natur vorkommende biologische Oberfläche der Lotuspflanze kann zur technischen Nutzung nachgebildet werden. Es werden zwei Ansätze zur Herstellung von Kunststoffen verfolgt, die auf dem Lotuseffekt beruhen. Einerseits ist dies die Prägetechnologie, andererseits die Beschichtungstechnologie mit Nanopartikeln.

Bei der Prägetechnologie wird eine geeignete Nanostruktur in eine niederenergetische Polymermatrix geprägt. Die Anwendbarkeit dieser Technik ist jedoch auf einfache Formen beschränkt und schließt komplexe dreidimensionale Körper aus. Ein weiterer Nachteil der Prägetechnologie ist die Empfindlichkeit gegen mechanische Materialabnahme. Bei einem Verkratzen der Oberfläche ist die Nanostruktur an dieser Stelle zerstört und bildet sich nicht wieder zurück.

Eine aussichtsreichere Technologie ist die Beschichtung von Kunststoffprodukten mit hydrophoben Nanopartikeln. Hierbei ist die Anwendbarkeit auf komplexe dreidimensionale Körper möglich. Die Belastbarkeit gegenüber mechanischer Beanspruchung ist wesentlich verbessert, da eine Abtragung der Partikel, flächig oder auch in Form von Kratzbelastung, nicht zwangsläufig zu einem Verlust der Lotus-Effekt-Eigenschaft führt. Tiefer liegende Nanopartikel können die Funktion der zuvor an der Oberfläche vorhandenen Partikel übernehmen. Dies gilt auch für die im Außenbereich eingesetzten nanobeschichteten Oberflächen, die durch den Einfluß

der Witterung beschädigt werden. Auch im Preisvergleich ist die Beschichtung mit Nanopartikeln der Prägetechnologie weit überlegen, da für eine Beschichtung im Höchstfall wenige Gramm pro Quadratmeter Oberfläche nötig sind. Eine noch in der Entwicklung stehende Technologie, die in Zukunft Anwendung finden soll, ist das Spritzgießen von Kunststoffteilen mit integrierter Nanostruktur.

#### **4.8.3 Technische Ausführungen einer Mikrostruktur**

Eine Erfindung zu selbstreinigenden Oberflächen, basierend auf einer Mikrostruktur und einem Verfahren zur Herstellung einer solchen Mikrostruktur, wurde im Jahre 1994 zum Patent angemeldet. Am 23.12.1998 wurde diese Mikrostruktur, deren Wirkung mit dem Markennamen Lotus-Effect® bezeichnet wird, in einer europäischen Patentschrift [103] veröffentlicht.

Die technische Ausführung einer optimalen Mikrostruktur besteht aus einer Doppelstruktur aus zwei Schichten mit einer groben Struktur zwischen 10 µm und 50 µm und einer darüberliegenden Feinstruktur von 200 nm bis 5 µm [103]. Die zwischen den Mikrostrukturen eingeschlossene Luft ist unbedingt notwendig, um den Lotuseffekt zu gewährleisten.

#### **4.8.4 Die technische Anwendbarkeit des Lotuseffektes**

Da der Selbstreinigungseffekt nur mit fließendem Wasser wirksam ist, ist die Anwendung des Lotuseffekts nur dort sinnvoll, wo fließendes Wasser an einer Oberfläche entlanggleiten kann. Gegenstände, die starken und dauerhaften mechanischen Beanspruchungen unterliegen, wie z.B. Deformationen, sind für die Anwendung des Lotuseffektes ausgeschlossen, da ein Abrieb der Mikrostruktur den Effekt längerfristig zerstört. Beim Einsatz von Tensiden, wie z.B. Seife oder Waschmitteln, geht der Lotuseffekt ebenfalls verloren, da die Oberflächenspannung des Wassers verringert wird. Die Oberfläche wird jedoch nicht dauerhaft geschädigt, da nach Auswaschung der Netzmittel die Nanostruktur in Verbindung mit Wasser wieder funktionsfähig ist. Beispiele für eine bisherige Anwendung des Lotus-Effektes sind Fliesen, Dachziegel, Fassadenfarbe, Folien und Kunstfasertextilien [102].

#### 4.8.5 Der Lotuseffekt in der elektrischen Energietechnik

Der Lotuseffekt ist aufgrund der Fremdschichtproblematik für Oberflächen von Isolatoren interessant, wird aber bisher noch nicht in der elektrischen Energietechnik angewendet. Durch die derzeitigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten seitens der Kunststoffindustrie läßt dies für die Zukunft auch auf eine Anwendbarkeit in der Energietechnik hoffen, was zu einer entscheidenden Verbesserung der Oberflächenbeschaffenheit von Isolierteilen beitragen könnte. Besonders im Freiluftbereich mit stark ausgeprägten Fremdschichten könnte der Lotuseffekt genutzt werden. So kann die Kombination aus einem alterungsbeständigen Isolierwerkstoff und einer wasserabweisenden Oberfläche, hervorgerufen von dem Lotuseffekt, zu einer Verbesserung des Isolierstoffsystems beitragen.

Die technische Nutzung des Lotuseffektes wird allerdings derzeit in der elektrischen Energietechnik nicht verfolgt, da der Herstellungsprozeß einer Nanostruktur noch nicht ausreichend beherrscht wird. Erst seit kurzer Zeit [102] können geometrisch komplexe Gebilde mit dem auf dem Lotuseffekt beruhenden Oberflächen im Spritzgießverfahren hergestellt werden. Erste technische Anwendungen des Effektes waren in der Baubranche zu verzeichnen, wo ebene Flächen fließendem Wasser ausgesetzt sind, Beispiele hierzu sind Fliesen und Folien. Die Hersteller von Isolierwerkstoffen und Isolatoren der elektrischen Energietechnik sind mit Äußerungen zum Einsatz des Lotuseffektes in diesem Bereich sehr zurückhaltend, da überzeugende Vorversuche im Labor und Feldversuche aus der Praxis noch fehlen, die ein Langzeitverhalten des Effektes nachweisen könnten. In der Natur wird durch die ständige Produktion von Wachsen der Lotuseffekt aufrechterhalten. Dieser Vorgang kann bei der Nachahmung des Effektes in der Technik jedoch noch nicht realisiert werden. Der vermutlich hohe technische Aufwand für die Herstellung des Lotuseffektes dürfte für Silikonwerkstoffe, die bereits sehr hydrophob sind und Randwinkel über etwa  $120^\circ$  zeigen, nur eine geringe Verbesserung der Oberfläche ergeben. Bei Epoxidharz-Formstoffsystemen hingegen könnte der Lotuseffekt eine deutliche Verbesserung der Hydrophobieigenschaften darstellen. Detaillierte Untersuchungen hierzu stehen allerdings noch aus.

## **5 Diagnose von Isolierwerkstoffen**

### **5.1.1 Definition Diagnose**

In der elektrischen Energietechnik bezeichnet der Begriff „Diagnose“ die Gesamtheit der Prozesse der Feststellung des Istzustandes eines Betriebsmittels, der Interpretation der ermittelten Diagnosegrößen und der Bewertung mit eventueller Ergreifung von Maßnahmen.

### **5.1.2 Anwendungen der Diagnose**

Diagnose wird sowohl in den Netzen der elektrischen Energietechnik als auch für Laboruntersuchungen eingesetzt. Ziel der Diagnose im elektrischen Netz ist eine Zustandsüberwachung und Bewertung der Betriebsmittel und die Abschätzung der Restlebensdauer. Dabei ist zu unterscheiden zwischen der vorbeugenden Diagnose, die zum Schutz des Betriebsmittels dient und eventuelle Fehler voraussehbar macht, und einer Schadensdiagnose, die nach dem Eintritt eines Fehlers zur Feststellung der Ursache des Fehlers herangezogen wird. Die Inbetriebnahmeprüfung kann als erste Diagnoseprüfung zur vorbeugenden Diagnose des im Netz installierten Betriebsmittels gelten und soll der Aufdeckung von Montagefehlern dienen.

Bei Alterungsuntersuchungen im Labor werden Diagnoseverfahren eingesetzt, um Aussagen über das Alterungsverhalten von Isolierwerkstoffen und das Langzeitverhalten von Betriebsmitteln zu treffen. Das Ziel der Diagnose ist dabei, geeignete Meßgrößen zu ermitteln, um Veränderungen der Isolierstoffoberflächen analysieren und dabei auftretende Mechanismen klären zu können.

### **5.1.3 Diagnoseverfahren**

Die Alterung von Isolierstoffen wird von Phänomenen begleitet, die auf der Veränderung von physikalischen und chemischen Eigenschaften beruhen. Es werden elektrische, optische, akustische, mechanische, thermische und chemische Veränderungen zur meßtechnischen Erfassung herangezogen. Da die Alterung sehr oft mit Teilentladungen verbunden ist, sind diese als Indikator für Diagnosezwecke besonders geeignet [104]. Die Entladungen können sowohl mit elektrischen als auch

mit akustischen Methoden ermittelt werden. In [28] bzw. werden Grundlagen zur Teilentladungsmeßtechnik gegeben und gleichzeitig eine Vielzahl von Anwendungsfällen vorgestellt. Weitere elektrische Meßgrößen sind der Ableitstrom an einer Isolierkomponente, der dielektrische Verlustfaktor, der Isolationswiderstand und die Überschlagsspannung. Mit optischen Methoden können der Tropfenrandwinkel, die mikroskopische Oberflächenstruktur des Isolierstoffes, der Bedeckungsgrad bei Feuchte auf der Oberfläche und die Rauigkeit der Oberfläche ermittelt werden. Mechanische Veränderungen können aufgrund von geometrischen Veränderungen festgestellt werden. Mit thermischen Meßverfahren können kritische Stellen und Temperaturverläufe auf einer Isolierstoffoberfläche und an Kontaktstellen ermittelt werden. Chemische Methoden werden oft für Gas- oder Ölanalysen bei gasisolierten Schaltanlagen und bei Transformatoren verwendet, da bei Entladungserscheinungen chemische Zersetzungsprodukte entstehen.

Bei den Diagnoseverfahren wird zwischen Online-Diagnose und Offline-Diagnose unterschieden. Bei der Online-Diagnose wird während des Betriebes im elektrischen Netz oder eines Dauerversuchs im Labor bei anliegender Betriebsspannung eine Meßgröße ermittelt. Im Gegensatz hierzu ist die Offline-Diagnose ein Verfahren, bei dem das elektrische Netz abgeschaltet oder das Betriebsmittel ausgebaut ist. In Tabelle 5.1 sind typische Diagnosemethoden für die Charakterisierung fester Isolierwerkstoffe aufgestellt, die im Labor eingesetzt werden.



Tabelle 5.1: Übersicht typischer Diagnoseverfahren für feste Isolierstoffoberflächen

Diagnosegröße	Diagnosemethoden			
	elektrisch	optisch	online	offline
Teilentladungen	x	x	x	x
Ableitstrom und Phasenwinkel	x		x	x
Schichtleitfähigkeit, Verlustfaktor	x			x
Isolationswiderstand	x			x
Überschlagsspannung	x		x	x
Oberflächenbedeckungsgrad		x		x
Tropfenrandwinkel		x		x
Rauhigkeit		x		x
Mikrostruktur		x		x

## **5.2 Versuchstechnik zur Untersuchung von singulären Tropfen**

### **5.2.1 Wahl einer geeigneten Versuchstechnik**

Optische Systeme haben keine Rückwirkung auf das zu beobachtende Objekt, da sie berührungslos arbeiten und durch ihre Anwesenheit bei genügend großen Abständen die Tropfen im elektrischen Feld nicht beeinflussen. Sensoren am Meßobjekt würden im Gegensatz hierzu eine Feldverzerrung hervorrufen. Daher sind solche Meßmethoden hier ungeeignet und können ausgeschlossen werden.

Ein geeignetes Verfahren zur Charakterisierung der Vorgänge an und zwischen Tropfen ist die Beobachtung der Tropfen in der Profilansicht. Eine Draufsicht auf die Tropfen bietet im Gegensatz zur Profilansicht eine integrale Informationsgröße, wie sie bei der Hydrophobiebewertung notwendig ist. Integrale Diagnosemethoden können für die vorgesehenen Fragestellungen nicht eingesetzt werden, da diese eine Information über die gesamte Isolierstoffoberfläche ermitteln, und nur gering das Verhalten einzelner Tropfen beschreiben können.

Ein optisches Verfahren, das in Profilansicht arbeitet, ist eine Versuchstechnik, die zur Bestimmung des Randwinkels verwendet wird. Das Prinzip dieser Methode wird für die Beantwortung der Fragestellungen dieser Arbeit herangezogen. Es ist bisher jedoch bei Randwinkelmessungen nicht üblich, diese bei der Anwesenheit eines elektrischen Feldes durchzuführen. Die Untersuchung des elektrohydrodynamischen Tropfenverhaltens setzt jedoch die Analyse von singulären Tropfen im elektrischen Feld voraus. Aus diesem Grund wird auf ausreichend große Abstände zu geerdeten Teilen und zu den optischen Einrichtungen geachtet, damit Randwinkelmessungen bei gleichzeitig anliegender Hochspannung am Prüfkörper durchgeführt werden können.

Zur Untersuchung singulärer Tropfen im elektrischen Feld ist es außerdem notwendig, die Tropfen reproduzierbar zu erzeugen und an definierter Position auf der Prüfkörperoberfläche plazieren zu können. Dabei ist die Kenntnis des Volumens und der Volumenleitfähigkeit bedeutend. Die Reproduzierbarkeit des Spannungsverlaufes während einer Untersuchung wird durch die Verwendung eines Funktionsgenerators gewährleistet. Zur Eingrenzung der möglichen Parameter ist es notwendig, einen Modellisolator mit einfacher Geometrie zu verwenden, auf dessen

Oberfläche die singulären Tropfen in einem möglichst homogenen elektrischen Ursprungsfeld beobachtet und analysiert werden können.

Zusammenfassend werden optische Aufnahmesysteme, Vorrichtungen zur Erzeugung einzelner Tropfen und eine geeignete Spannungserzeugung und Spannungsmessung für hohe Gleich- und Wechselspannungen benötigt.

### 5.2.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau zur experimentellen Untersuchung singulärer Tropfen im elektrischen Feld besteht aus zwei voneinander unabhängigen Systemen zur Erzeugung der Hochspannung. Ein Aufbau wird zur Erzeugung einer hohen Wechselspannung, der andere Aufbau zur Erzeugung einer hohen Gleichspannung verwendet. Für die Analyse der Tropfen auf der Isolierstoffoberfläche werden zwei optische Einrichtungen eingesetzt, ein digitales Randwinkel-Meßsystem und ein digitales Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem. Bild 5.1 gibt einen Überblick des Versuchsaufbaus mit der Erzeugung der Wechselspannung, dem Randwinkel-Meßsystem und der Meßwerterfassung. Die einzelnen Komponenten werden im folgenden vorgestellt.



Bedieneinheiten

Hochspannungsbereich

Bild 5.1: Gesamtbild des Versuchsaufbaus zur Diagnose singulärer Tropfen

### 5.2.3 Das Randwinkel-Meßsystem

Zur Diagnose von singulären Tropfen auf einer Isolierstoffoberfläche wird das Randwinkel-Meßsystem G10 L der Firma Krüss, Hamburg, eingesetzt. Das computergesteuerte System, in Bild 5.2 dargestellt, besteht aus einer Metallkonstruktion, an der eine digitale Videokamera mit Linsensystem und Fokussiereinrichtung, ein verfahrbarer Probentisch, eine Dosier- und Positioniereinrichtung für Prüfflüssigkeiten und eine Halogenlichtquelle auf der gegenüberliegenden Seite der optischen Aufnahmeeinheit befestigt sind. Das Gerät hat etwa eine Länge von 80 cm, eine Breite von 20 cm und eine Höhe von 45 cm. Diese Abmessungen gewährleisten einen genügend großen Abstand zwischen dem mit Hochspannung belasteten Prüfobjekt in der Mitte der optischen Achse auf dem Probentisch und der optischen Einheit des Gerätes, so daß eine Feldbeanspruchung während der Randwinkelmessungen möglich ist.

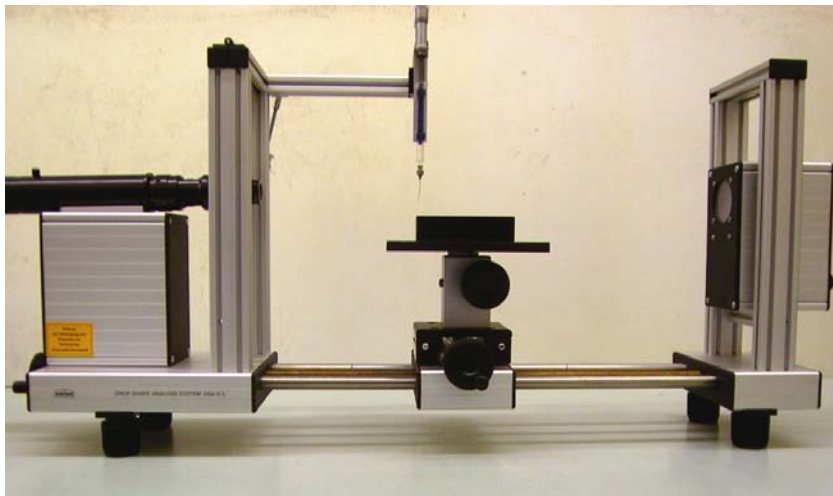


Bild 5.2: Randwinkel-Meßsystem

Zum Aufbringen der zu beobachtenden Flüssigkeit auf dem Prüfkörper dient eine Dosiereinrichtung mit einer montierten Glasspritze, die in vertikaler und horizontaler Richtung zur Positionierung einzelner Tropfen bewegt werden kann. Anhand einer Millimeterskala auf den beiden beweglichen Achsen der Dosiereinrichtung kann die Flüssigkeit auf der Prüfkörperoberfläche exakt an einer definierten Position abgesetzt werden. Zur Dosierung der Flüssigkeit drückt eine Mikrometerschraube den Stempel

der in vertikaler Achse montierten Glasspritze. Die eingespannte Glasspritze mit auswechselbarer Kanüle hat ein Fassungsvermögen von 4 ml. Der Arm der Halterung, an dem die Dosiereinrichtung befestigt ist, kann bei Bedarf aus der optischen Achse bewegt werden und zur Seite hinter die optische Einrichtung mit Linsensystem und Kamera geklappt werden. Zur Aufnahme der aufgesetzten Flüssigkeit in Form eines singulären Tropfens wird der höhenverstellbare Probenstisch so positioniert, daß dieser im Bildausschnitt der Kamera fokussiert ist. Auf der horizontalen optischen Achse befinden sich eine Halogenlampe, der Prüfkörper und die digitale Videokamera. Das Prüfobjekt wird in Gegenlichttechnik aufgenommen, d.h. gegenüber dem optischen Aufnahmesystem befindet sich die Halogenlampe als Gegenlichtquelle, die für einen hellen Hintergrund der Aufnahme sorgt.

Die digitale Videokamera, Sony Typ XC-77CE, fokussiert die Mitte der Prüfkörperoberfläche in etwa 30 cm Entfernung. Die Bildsignale der Kamera werden von einer Videokarte verarbeitet, Typ Matrox Pulsar, die sich als Einsteckkarte in einem Computer befindet und Darstellungen der aufgenommenen Bilder auf einem Monitor ermöglicht. Die dimmbare Halogenlampe ist für den Kontrast des Tropfens im digitalisierten Bild verantwortlich. Die zu beobachtenden singulären Tropfen auf der Isolatoroberfläche werden als schwarze Silhouetten mit weißem Hintergrund hervorgerufen durch die Gegenlichtquelle gegenüber der digitalen Kamera, dargestellt.

Die monochrome Digitalvideokamera besitzt eine Auflösung von 756 horizontalen x 581 vertikalen Pixeln bei einer Farbtiefe von 8 bit. Der 2/3-inch große CCD-Chip als Bildsensor wandelt aufgefangene Elektronen um und sammelt diese generierte Ladung über einen definierten Zeitraum an. Dadurch entsteht ein ortsdiskretes Bild mit Grauwerten in Abhängigkeit der angesammelten elektrischen Ladung. Der Chip besteht aus 11 x 11 µm großen Pixeln. Diese Eigenschaft der quadratischen Pixel ist für den hier beschriebenen Anwendungsfall wichtig, da bei einer Horizontal- zu Vertikalauflösung von 1:1 Bildverzerrungen vermieden werden, was für präzise Randwinkelmessungen unbedingt erforderlich ist.

Die aufgefangenen Elektronen in jedem Pixel können auf zwei unterschiedliche Weisen ausgelesen werden, einerseits mit der Field-Integrationsmethode oder

andererseits mit der Frame-Integrationsmethode. Bei der ersten Methode werden die ungeraden Zeilen des Chip und die geraden Zeilen des Chip separiert. In zwei Schritten, einmal die geradzahligen Zeilen und das nächste Mal die ungeradzahligen Zeilen, werden die Pixel ausgelesen. Dies führt zur höchsten Auflösung und benötigt bei dem verwendeten Chip 1/25 Sekunden. Bei der zweiten Methode wird nur jede zweite Pixelzeile ausgelesen, was zur doppelten Auslesegeschwindigkeit, aber verminderter Auflösung führt. So ist eine maximale Aufnahmegeschwindigkeit von 50 Frames pro Sekunde möglich.

Zur objektiven Auswertung der Bildaufnahmen wird mit Hilfe des Programms „Drop Shape Analysis“ Version 1.5 der Firma Krüss die Flüssigkeitsoberfläche des Tropfenprofils durch einen Algorithmus angenähert, um den Randwinkel an den beiden Tripelpunkten bestimmen zu können. Es stehen mehrere Algorithmen zur Beschreibung des Tropfenprofils zur Verfügung, wobei nur die Methoden „Tangenten-Verfahren 1“ und „Tangenten-Verfahren 2“ hier Anwendung finden, da diese eine Unterscheidung zwischen dem rechten und linken Randwinkel zulassen. Bei den weiteren Methoden „Young-Laplace-Verfahren“ und „Höhen-Breiten-Verfahren“ wird als Ergebnis der Messung der Mittelwert des rechten und linken Randwinkels ausgegeben, was für die hier vorgestellten Untersuchungen ungeeignet ist.

Beim Tangenten-Verfahren 1 wird das gesamte Profil eines liegenden Tropfens mathematisch an eine allgemeine Ellipsengleichung angepaßt. Das Verfahren ist sehr genau für Tropfen mit Randwinkeln kleiner als  $90^\circ$ , die keine Deformierung im elektrischen Feld erfahren haben. Das Tangenten-Verfahren 2 berücksichtigt ein nichtlineares Polynom und paßt dieses an die Kontur eines liegenden Tropfens an. Dieses Verfahren eignet sich besonders für Tropfen, die sich im elektrischen Feld unsymmetrisch verformt haben.

Beide Verfahren errechnen aus den Ableitungen der mathematischen Gleichungen die Steigungen an der Basislinie zwischen Flüssigkeit und Feststoff. Aus diesen ergeben sich die Randwinkel in den beiden Dreiphasenkontaktpunkten. Die berechneten Randwinkel können nach Herstellerangaben mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,5^\circ$  ermittelt werden.

Das Randwinkel-Meßsystem eignet sich, begrenzt durch die Aufnahmerate von maximal 50 Frames pro Sekunde, nur für die Aufnahme und Analyse dynamisch langsamer Vorgänge in Sekunden-, Minuten- oder Stundenintervallen.

#### 5.2.4 Das Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem

Für sehr schnelle dynamische Beobachtungen im Millisekundenbereich wird das digitale Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem PCI 2000SC der Firma Redlake Imaging Corporation, USA eingesetzt. Das System besteht aus einer digitalen Videokamera mit einem CCD-Chip und einem Linsensystem, einer Videodigitalisierkarte und einem Softwareprogramm zur Erfassung und Wiedergabe der farbigen Videoaufnahmen. Bild 5.3 zeigt den Kamerakopf mit dem angeschlossenen Datenkabel, das zu einer Videokarte in einem Computer führt.



Bild 5.3: Hochgeschwindigkeitskamera

Die digitale Hochgeschwindigkeitskamera hat die Aufnahmemöglichkeit von maximal zwei Sekunden bei einer Bildrate von 1000 Frames/Sekunde oder 2000 Frames/Sekunde. In den hier vorgestellten Untersuchungen werden diese beiden Bildraten verwendet. Bei 1000 Frames/Sekunde werden 2048 Frames mit einer Auflösung von 240 x 210 Pixel aufgenommen, während bei 2000 Frames/Sekunde 4096 Frames aufgenommen werden mit einer Auflösung von 240 x 92 Pixel. In diesem Fall verringert sich die Höhe des Bildes. Die maximale

Auflösung der Bilder von 480 x 420 Pixel wird bei einer Bildrate von 50 Frames/Sekunde erreicht. Dabei beträgt die maximale Aufnahmezeit 10,2 Sekunden. Die Größe eines Pixels beträgt 7,4 µm x 7,4 µm, so daß wie bei dem Randwinkel-Meßsystem eine Horizontal- zu Vertikalauflösung von 1:1 besteht, die verzerrungsfreie Bilder garantiert.

Die Kamera ist mit einer elektronischen Blende ausgestattet, die Werte von 1/60 bis 1/1200 annehmen kann. Bei Videoaufnahmen mit hohen Bildraten ist eine hohe Beleuchtungsstärke notwendig, um bei sehr geringen Verschußzeiten ausreichende Belichtungsverhältnisse zu schaffen. Nach Herstellerangaben wird bei einer Aufnahmerate von 1000 Frames eine Beleuchtungsstärke von 17,2 Lux und bei 2000 Frames die doppelte Beleuchtungsstärke benötigt. Bei den durchgeführten Untersuchungen wird zum Ausleuchten des Prüfköpers eine Halogenlampe mit einer Leistung von 1000 W verwendet.

Das Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem hat, bedingt durch die hohe Datenrate in geringer Zeit, einen Zwischenspeicher auf der Videodigitalisierkarte, die in einem Computer installiert ist. Beim Starten einer Videoaufnahme wird die Bildinformation des CCD-Chip von der Videokarte in Echtzeit digitalisiert und dort in einem auf der Karte befindlichem Arbeitsspeichermodule (RAM) zwischengespeichert. In diesem Arbeitsspeicher, der als Ringspeicher eingesetzt wird, werden solange die einzelnen Bilder gespeichert, bis die Speicherkapazität erschöpft ist. Tritt dieser Fall ein, werden die zuerst gespeicherten Daten von den neuen Bilddaten überschrieben. Diese Technik des Ringspeichers wird für die Triggerfunktion des Systems genutzt. So ist es mit der Pre-Triggerfunktion der Kamera möglich, Bilder der letzten zwei Sekunden vor Triggerbeginn aufzunehmen. Auch können die Aufnahmen ab dem Starten des Triggersignals mit der Post-Triggerfunktion um maximal zwei Sekunden verzögert werden. Für die Aufnahmen dieser Arbeit wird weder die Pre- noch die Post-Triggerfunktion des Kamerasystems verwendet. Die Aufnahmen werden sofort bei Erkennung des Triggersignals gestartet.

Die Videoaufnahmen können mit dem Softwareprogramm zur Steuerung der Kamera am Bildschirm oder von extern durch ein Triggersignal von maximal 5 V gestartet werden. Die Methode der externen Triggerung des Aufnahmezeitpunkts findet in den durchgeführten Untersuchungen Anwendung, um einen definierten Aufnahmebeginn



zu erzeugen, so daß Einzelbilder einer Aufnahme verschiedenen Zeitpunkten einer Spannungsperiode zugeordnet werden können. Das Triggersignal wird von einem Transientenrekorder, der die Kurvenform der anliegenden Hochspannung aufnimmt, in Form eines TTL-Signals generiert und der Videodigitalisierkarte des Hochgeschwindigkeits-Kamerasystems zugeführt. Auf diese Weise wird eine Synchronisation zwischen den Bildaufnahmen und dem Spannungsverlauf hergestellt und eine phasengenaue Zuordnung der Bilddaten ermöglicht.

Nach einer durchgeführten Aufnahme kann die Videosequenz aus dem Ringspeicher auf die Festplatte des Computers gespeichert werden. Die Software „Redlake MotionScope Media Player“ zeigt bei der Wiedergabe der aufgenommenen Videosequenz die Nummer des Frames und die seit dem Start der Aufnahme vergangene Zeit in Millisekunden. Die Wiedergabesoftware bietet die Möglichkeit, den Videofilm mit wählbaren Wiedergaberaten abzuspielen. Der Videofilm kann in voller Länge als Bildsequenz oder abschnittsweise oder als Einzelbilder mit dem Programm abgespeichert werden. In den experimentellen Untersuchungen wurden zunächst Videosequenzen aufgenommen und abgespeichert. Zur Dokumentation des Tropfenverhaltens wurden anschließend einzelne Bilder der Videosequenzen ausgewählt, wie dies im Bildteil des Anhangs dieser Arbeit zu sehen ist.

### **5.2.5 Erzeugung und Messung der Hochspannung**

Zur Untersuchung von Tropfen im elektrischen Feld werden sowohl hohe Wechselspannungen als auch hohe Gleichspannungen berücksichtigt. Hierzu werden zwei verschiedene Systeme zur Hochspannungserzeugung eingesetzt.

Zur Erzeugung der Wechselspannung wird eine Kombination aus einem digitalen Funktionsgenerator, einem Leistungsverstärker und einem Mittelspannungswandler verwendet. Mit dem Funktionsgenerator, Sony-Tektronix Typ AFG2020, können periodische und nichtperiodische Kurvenformen mit einer maximalen Amplitude von  $\hat{u} = \pm 5 \text{ V}$  ausgegeben werden. Die Frequenz kann zwischen  $f = 0 \text{ Hz}$  bis  $f = 100 \text{ MHz}$  für sinusförmige Signale und zwischen  $f = 0 \text{ Hz}$  bis  $f = 2,5 \text{ MHz}$  für frei wählbare Kurvenformen variiert werden. Der Funktionsgenerator ist Bild 5.4 dargestellt. Das Signal des Funktionsgenerators wird mit einem Leistungsverstärker, Hersteller Krohn Hite, USA, Typ DCA-50, verstärkt. Dessen Ausgangssignal wird

einem Mittelspannungswandler mit einem Übersetzungsverhältnis von  $\bar{u} = 200:1$  zur Transformation auf Hochpotential zugeführt. Die so realisierte Hochspannungsquelle, in Bild 5.5 dargestellt, kann eine Wechselspannung mit einer maximalen Amplitude am Prüfkörper von  $\hat{u} = 13,0 \text{ kV}$  bei  $f = 50 \text{ Hz}$  bereitstellen. Vorteilhaft bei dieser Art der Spannungserzeugung ist die Unabhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Versorgungsspannung des Experimentiernetzes im Labor, die durch Unregelmäßigkeiten in Amplitude und Kurvenform gekennzeichnet ist.

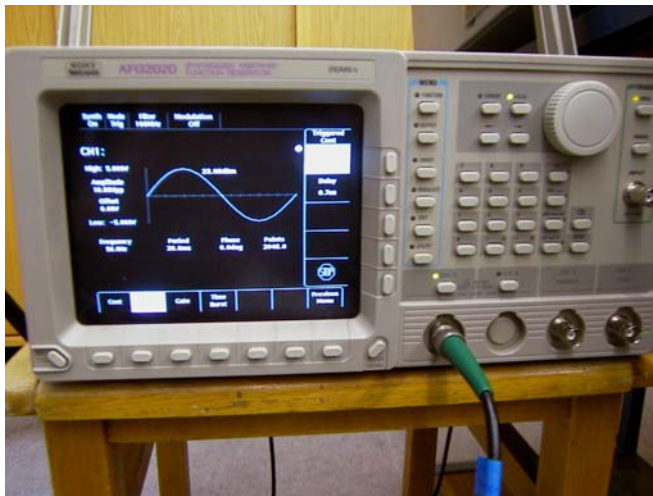


Bild 5.4: Erzeugung einer reproduzierbaren Wechselspannung mit einem Funktionsgenerator

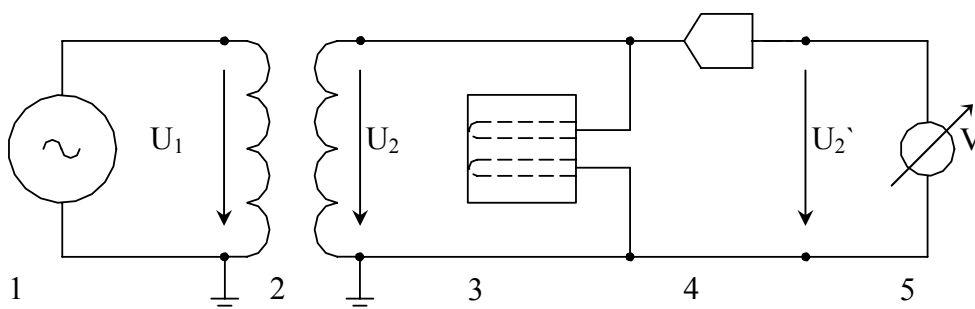


Bild 5.5: Schaltbild der Spannungserzeugung und Messung

- 1: Funktionsgenerator und Verstärker
- 2: Hochspannungstransformator
- 3: Prüfkörper
- 4: Hochspannungstastkopf
- 5: Oszilloskop

Die anliegende Wechselspannung am Prüfkörper wird mit einem Hochspannungstastkopf, Tektronix Typ P6015A, mit einem Übersetzungsverhältnis von  $\bar{u} = 1000:1$  gemessen und deren Spannungsverlauf mit einem Transientenrekorder, Nicolet Typ 60 Pro, mit 8 bit und einer Auflösung von 200 Mega Samples pro Sekunde aufgenommen. Mit der Triggerfunktion des Transientenrekorders kann zum Zeitpunkt eines Nulldurchgangs der Meßspannung ein Spannungssprung von  $U = 0V$  auf die Höhe eines TTL-Signals generiert werden. Das ausgegebene TTL-Signal des Transientenrekorders wird dem Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem als Triggersignal zugeführt, um eine Synchronisation zwischen dem Spannungsverlauf und dem Startzeitpunkt einer Videoaufnahme zu ermöglichen. Auf diese Weise können die digitalen Bilder der Kamera den jeweiligen Zeitpunkten einer Spannungsperiode zugeordnet werden. Zur Erzeugung einer hohen Gleichspannung wird ein Kompaktgerät mit integrierter Spannungsmessung und Überstromauslösung verwendet. Mit dieser Spannungsquelle kann eine einstellbare Gleichspannung bis maximal  $u = 20\text{ kV}$  erzeugt werden. Zur zusätzlichen Messung der anliegenden Gleichspannung am Prüfkörper wird ein ohmscher Spannungsteiler mit einem Übersetzungsverhältnis von  $\bar{u} = 10000:1$  parallel zum Prüfkörper angeschlossen.

## 6 Experimentelle Untersuchungen

### 6.1 Parameter

Zur Realisierung der festgelegten Ziele ist es nötig, die Vielzahl der möglichen Parameter des Dreiphasensystems Isolierwerkstoff – Flüssigkeit – Gas einzugrenzen. Vereinfachungen und Idealisierungen sind Voraussetzung zur systematischen Untersuchung der Parameterkombinationen. Wie in [105] bereits vorgestellt und in erweiterter Form in Tabelle 6.1 dargestellt, gibt es zahlreiche Einflußparameter, die bei einer Anordnung von Tropfen auf einer Isolierstoffoberfläche variiert werden können. In den experimentellen Untersuchungen werden hiervon ausgewählte Parameter systematisch bezüglich ihres Einflusses auf das Verhalten der Tropfen im elektrischen Feld analysiert.

Die Vorbetrachtungen zeigen, daß reales Wasser in vielfältiger Form durch Niederschlag oder Kondensation mit zahlreichen gelösten Inhaltsstoffen aus dem Wasserkreislauf auf die Isolierstoffoberfläche von Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik gelangt. Wie aus den physikalischen und chemischen Eigenschaften des fallenden und des abgesetzten Niederschlages hervorgeht, variiert die Tropfengröße von weniger als  $0,5 \cdot 10^{-3} \mu\text{l}$  bis über  $110 \mu\text{l}$  bei sehr unterschiedlicher Zusammensetzung der gelösten Inhaltsstoffe. Bei den durchgeführten Untersuchungen werden Tropfengrößen von  $1 \mu\text{l}$  bis  $300 \mu\text{l}$  verwendet, nicht aber die zahlreichen Variationen von Inhaltsstoffen. Da die Fragestellung auf eine Mechanismenklärung zielt, wird als Referenzparameter doppelt destilliertes Wasser mit einer Volumenleitfähigkeit von weniger als  $1 \mu\text{S/cm}$  verwendet. In z.B. [106] wird zwar kein Unterschied zwischen destilliertem Wasser und gewöhnlichem Wasser der öffentlichen Wasserversorgung bei Detailuntersuchungen an singulären Tropfen festgestellt, es soll aber hier aufgrund der Reproduzierbarkeit mit doppelt destilliertem Wasser gearbeitet werden. In einigen Experimenten wird doppelt destilliertes Wasser unter der Zugabe von reinem Natriumchlorid ( $\text{NaCl}$ ) verwendet, um den Einfluß der Leitfähigkeit des Wassers festzustellen.

Tabelle 6.1: Einflußparameter bei singulären Tropfen auf Isolierstoffoberflächen

<b>Elektrische Belastung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhe der angelegten Spannung</li> <li>• Art der Spannung (Wechselspannung, Gleichspannung, Stoßspannung)</li> <li>• Spannungsform (periodische und nichtperiodische Funktionen, Sprungfunktionen)</li> <li>• Frequenz der Spannung</li> </ul>
<b>Flüssigkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Art der Flüssigkeit (Wasser, Lauge, Säure)</li> <li>• Volumen der Flüssigkeitstropfen</li> <li>• Anzahl der Tropfen</li> <li>• Volumenleitfähigkeit der Flüssigkeit</li> <li>• Abstand der Tropfen zueinander</li> <li>• Position des/der Tropfen im elektrischen Feld</li> </ul>
<b>Isolierwerkstoff</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Art des Isolierwerkstoffes</li> <li>• Geometrie des Isolators</li> <li>• Feldrichtung bezüglich der Isolierstoffoberfläche (radial, axial, Mischform)</li> <li>• Oberflächeneigenschaften der Isolierstoffoberfläche (Rauhigkeit)</li> <li>• Alterungszustand des Isolierstoffes</li> <li>• Flüssigkeitsaufnahme des Isolierstoffes (feststellbar durch z.B. Wasserlagerung)</li> <li>• Grenzflächen am Isolator</li> <li>• Neigungswinkel der untersuchten Isolierstoffoberfläche</li> <li>• Krümmungsradius der Isolierstoffoberfläche, z.B. durch Schirmform, (konvex, konkav)</li> </ul>
<b>Umgebungsbedingungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umgebungstemperatur</li> <li>• Umgebungsfeuchte</li> <li>• Umgebungsluftdruck</li> <li>• Luftbewegungen (Windstärke)</li> <li>• Strahlung (ultraviolett und infrarot)</li> <li>• Gaszusammensetzungen</li> </ul>

Es werden drei verschiedene Epoxidharz-Formstoffsysteme als Feststoff gewählt. Zwei dieser Systeme sind bereits aus Alterungsuntersuchungen in [81] bekannt. Alle drei Materialien werden als Isolierwerkstoffe für reale Hochspannungsanwendungen in der Innenraum-, bzw. in der Freilufttechnik eingesetzt. Für einige Untersuchungen mit superhydrophoben Oberflächen, die mit dem Lotuseffekt hervorgerufen werden, wird ein Prüfkörper eines vorhandenen Epoxidharz-Formstoffes mit einem silikonbasiertem und auf dem Lotuseffekt beruhendem Material mit einer Schichtdicke von etwa 0,25 mm überzogen.

Die ebenen Oberflächen der gewählten Prüfkörper werden in der Mehrzahl der Versuche horizontal ausgerichtet, da dies einen ungleichmäßigen Einfluß der Schwerkraft auf die Flüssigkeit reduziert und Abrollvorgänge vermeidet. Obwohl reale Isolierkörper kurvenförmige Strukturen aufweisen, werden hier singuläre Tropfen nur auf planen Oberflächen untersucht. Diese Vereinfachung ist für eine Mechanismenklärung zunächst notwendig. Da in dieser Arbeit ein Beitrag zur Klärung der Alterungsfrühphase geleistet werden soll, werden für die durchgeführten Untersuchungen nur Prüfkörper im Neuzustand verwendet. Bei gealterten Prüfkörpern liegen Inhomogenitäten auf der Oberfläche vor, die für grundlegende Untersuchungen negativen Einfluß haben, da hier die Reproduzierbarkeit wegen bereits erfolgter Alterung nicht definiertem Ausmaßes nicht gegeben ist.

Auf die gasförmige Umgebung der auf der Isolierstoffoberfläche plazierten Tropfen wird bei den vorliegenden Untersuchungen kein Einfluß genommen. Es herrschen die Umgebungsbedingungen, die in Form von Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte für jedes Experiment dokumentiert werden.

Der gewählte Aufbau zur Erzeugung einer hohen Wechselspannung hat eine maximale Ausgangsspannung bei gleichzeitig angeschlossenen Prüfkörper von  $\hat{u} = 13,0 \text{ kV}$ . Dies ist somit die höchste reproduzierbare Wechselspannung, die für die vorliegenden Untersuchungen eingesetzt werden kann. Da elektrohydrodynamische Prozesse untersucht werden, ist dieser Wert bei der gewählten Prüfkörpergeometrie ausreichend, um das Tropfenverhalten ohne den Einfluß von ausgeprägten Entladungserscheinungen zu untersuchen. In dieser Arbeit wird die Amplitude der anliegenden Spannung  $\hat{u}$  angegeben, die am Transientenrekorder unter Berücksichtigung des Übersetzungsverhältnisses des

Hochspannungstastkopfes ausgegeben wird, obwohl für Energiebetrachtungen der um den Faktor  $\sqrt{2}$  bei sinusförmigen Spannungen niedrigere Effektivwert der Hochspannung entscheidend ist. Bei Untersuchungen mit hoher Gleichspannung wird eine maximale Spannung von  $u = 20 \text{ kV}$  verwendet. In Tabelle 6.2 [105] sind die beschriebenen Parameter zusammengefaßt.

Tabelle 6.2: Untersuchte Parameter

<b>Elektrische Belastung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Art und Höhe der Spannung</li> <li>• Frequenz der Wechselspannung</li> <li>• Spannungsform</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wechselspannung <math>\hat{u} = 0 \dots 13 \text{ kV}</math> Gleichspannung <math>u = 0 \dots 20 \text{ kV}</math></li> <li>• <math>f = 40 \dots 300 \text{ Hz}</math></li> <li>• sinusförmige Funktionen, Sprungfunktionen, nichtsinusförmige Funktionen</li> </ul>
<b>Flüssigkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Art der Flüssigkeit</li> <li>• Volumen der Flüssigkeitstropfen</li> <li>• Volumenleitfähigkeit</li> <li>• Anzahl der Tropfen</li> <li>• Abstand der Tropfen zueinander</li> <li>• Position im elektrischen Feld des oder der Tropfen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• doppelt destilliertes <math>\text{H}_2\text{O}</math></li> <li>• <math>V = 1 \dots 300 \mu\text{l}</math></li> <li>• <math>\kappa = 1 \dots 10000 \mu\text{S/cm}</math></li> <li>• 1, 2, 3, 9</li> <li>• <math>a = 0,5 \dots 5 \text{ mm}</math></li> <li>• <math>x = 0 \dots \pm 10 \text{ mm}</math>, <math>y = 0 \dots \pm 10 \text{ mm}</math>, siehe Koordinatensystem in Kapitel 6.2</li> </ul>
<b>Isolierwerkstoff</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Art des Isolierwerkstoffes</li> <li>• Oberflächeneigenschaften der Isolierstoffoberfläche</li> <li>• Neigungswinkel der Isolierstoffoberfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• drei Epoxidharz-Formstoffsysteme, ein beschichteter Prüfkörper</li> <li>• Neuzustand</li> <li>• <math>\alpha = 0^\circ \dots 50^\circ</math> gegen Horizontale</li> </ul>

## 6.2 Prüfkörper

Reale Isolatoren weisen Oberflächen unterschiedlicher Krümmungen und Neigungswinkel auf. Für die hier durchgeführten Untersuchungen werden ebene Modellisolatoren aus Epoxidharz-Formstoff verwendet, die eine Idealisierung eines realen Isolators darstellen. Eine Forderung, die an die zu wählende Geometrie des Prüfkörpers zu stellen ist, bezieht sich auf das elektrische Feld an der Oberfläche des Isolierkörpers. Dieses soll ohne Tropfenbelag möglichst homogen und parallel zur Isolierstoffoberfläche verlaufen. Die Homogenität des Feldes wird gefordert, da bei der Anwesenheit eines Tropfens auf der Isolierstoffoberfläche das elektrische Feld durch den Tropfen verändert wird. Diese Veränderung kann sich auf das Verhalten des Tropfens auswirken. Es ist somit von Vorteil, wenn der Tropfen nicht durch eine von der Prüfkörpergeometrie hervorgerufenen Feldunregelmäßigkeit beeinflusst wird, sondern nur durch seine Anwesenheit den Feldverlauf in einen inhomogenen Zustand versetzt.

Nach [43] bestehen entscheidende Unterschiede bezüglich des Überschlagsverhaltens an einzelnen Wassertropfen, das von der Gestaltung der Strecke zwischen Wassertropfen und Spannungsversorgung beeinflusst wird. Bei einem Tropfen, der ohne leitende Verbindung zu einer Spannungsquelle im elektrischen Feld positioniert ist, werden keine für den Gasdurchschlag typischen äußeren Teilentladungen (Vorentladungen) beobachtet. Der Grund hierfür ist die unterbrochene Verbindung zur Spannungsquelle, so daß Ladungen nicht kontinuierlich nachfließen können. In [107] wird in diesem Fall eine beobachtete Tropfeninstabilität durch den Verlust von Ladung des ursprünglich neutralen Wassertropfens an die Umgebung erklärt. Dieser Effekt wird bei hoher Luftfeuchte begünstigt.

Der Ansatz zur Vermeidung von direkten Verbindungen zwischen Wassertropfen und Spannungsquelle wird in [47] ebenfalls angedeutet, kann dort aber mit einer beschichteten Epoxidharz-Formstoff-Isolierung auf den Metallelektroden nicht für die vorgesehenen Untersuchungen eingesetzt werden. An der gewählten Anordnung werden Teilentladungen festgestellt, die bereits ohne das Aufbringen von Feuchte zwischen den Elektroden auf der Isolierstoffoberfläche auftreten, so daß



Teilentladungen, hervorgerufen durch singuläre Tropfen, nicht von den aus der Geometrie vorgegebenen Entladungen unterschieden werden können.

Aus diesen Überlegungen und dem Ziel, elektrohydrodynamische Phänomene zu beobachten und nicht das Entladungs- oder Überschlagsverhalten, wird bei der Formgestaltung darauf geachtet, die Elektroden in das Material zu integrieren. So wird die Wahrscheinlichkeit für Entladungserscheinungen erheblich reduziert und die elektrohydrodynamischen Prozesse im und am Tropfen intensiviert. Das Einbetten der Elektroden entspricht weniger realen Isolieranordnungen, bei denen oft metallische Elektroden an einer Grenzfläche den festen Isolierwerkstoff kontaktieren, wird aber für die Mechanismenklärung als vorteilhaft bewertet.

Ein zweiter Grund für die Kontaktierung der Isolierstoffoberfläche mit dem Isolierwerkstoff ist die Vermeidung von hohen elektrischen Feldstärken an den Grenzflächen zwischen Elektrode und Isoliermaterial. Bei einem Prüfkörper mit aufgesetzten halbzyklindrischen metallischen Elektroden zeigen Feldberechnungen in [108] eine erhebliche Felderhöhung an der Grenzfläche von Elektroden und Isolierwerkstoff, die etwa die Hälfte der von singulären Tropfen hervorgerufenen Feldüberhöhungen betragen. Durch eine Integration der Elektroden in den Isolierwerkstoff können hohe elektrische Feldstärken, hervorgerufen durch den Prüfkörper, vermieden werden.

Durch die Möglichkeit, im eigenen Gießlabor Prüfkörper herstellen zu können, kann ein Prüfkörper mit eingegossener Elektrodenanordnung realisiert werden, so daß kein metallischer Kontakt auf der Isolierstoffoberfläche entsteht und die Grenzfläche Gas-Isolierwerkstoff-Elektrodenmaterial auf eine Grenzfläche zwischen Isolierwerkstoff und Elektrodenmaterial reduziert wird.

Unter Berücksichtigung der Elektrodenlänge, des Abstandes der Elektroden zueinander und des Radius der Elektroden wurde der Prüfkörper in einem Optimierungsprozeß anhand von Feldberechnungen ausgelegt. Ziel dabei war, ein möglichst homogenes paralleles Feld auf der Isolierstoffoberfläche zu erzeugen. In Bild 6.1 ist die gewählte Geometrie des Modellprüfkörpers mit Angaben in Millimeter dargestellt. Dabei handelt es sich um einen im eigenen Gießlabor hergestellten Epoxidharzblock mit einer Länge und einer Breite von jeweils 100,0 mm und einer Höhe von 20,0 mm, in den unter der Oberfläche im Abstand von

einem Millimeter zylindrische Elektroden aus Messing eingegossen sind. Die Elektroden haben jeweils einen Radius von 7,5 mm und eine Länge von 99,0 mm. Ihr Abstand zueinander von den Mittelpunkten der Elektroden gemessen beträgt 35,0 mm.

Ein dreidimensionales Koordinatensystem wird auf der Oberfläche des Prüfkörpers definiert, um Angaben über die Position der untersuchten Tropfen und deren Verhalten zu ermöglichen. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt im Schnittpunkt der sich schneidenden Diagonalen der quadratischen Oberfläche. Das Koordinatensystem wird auf der Prüfkörperoberfläche so fixiert, daß die negative y-Achse in die Richtung der freiliegenden Elektrodenenden zeigt, an denen die Zuleitungen der Spannungsversorgung angeschlossen sind. Im Bereich der positiven x-Koordinate befindet sich der Hochspannungsanschluß, an der im negativen x-Koordinatenbereich liegenden Elektrode der Erdpotentialanschluß, wie in Bild 6.1 dargestellt.

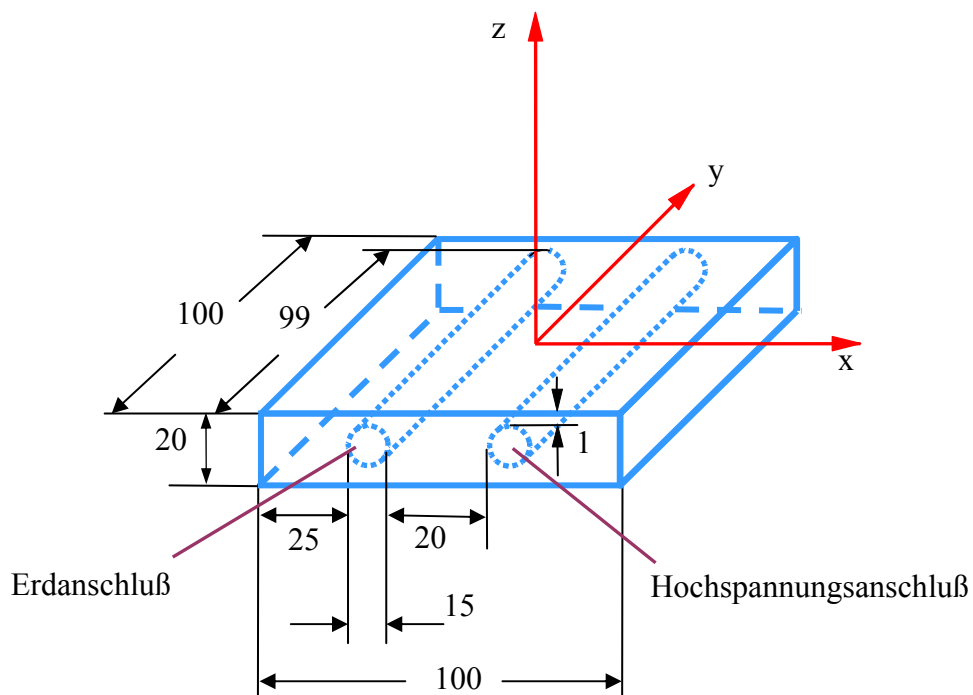


Bild 6.1: Geometrie des Prüfkörpers und Definition eines Koordinatensystems auf der Isolierstoffoberfläche

Die Untersuchungen werden an drei verschiedenen Epoxidharz-Formstoffsystemen durchgeführt, deren Komponenten in Form von Produktbezeichnungen in Tabelle 6.3 zusammengestellt sind. Es sind mit Inhaltsstoffen der Firma Vantico AG, Schweiz quarzmehlgefüllte Systeme, die auch für reale Isolatoren Anwendung finden.

Auf der Basis dieser Epoxidharz-Prüfkörper werden weitere Prüfkörper mit Beschichtungen hergestellt. Dabei werden Prüfkörper des Materials 2 mit einer auf Silikon basierenden und mit dem Lotuseffekt versehenen Beschichtung der Dicke von etwa 0,25 mm aufgetragen. Diese werden im folgenden als Material 4 bezeichnet.

Tabelle 6.3: Eigenschaften der untersuchten Epoxidharz-Formstoffsysteme

	<b>Material 1</b>	<b>Material 2</b>	<b>Material 3</b>	<b>Material 2 mit Lotuseffekt (im folgenden als Material 4 bezeichnet)</b>
<b>Formstoff- system</b>	aromatisches System	aromatisches System	cyclo- aliphatisches System	aromatisches System mit Beschichtung
<b>Harz</b> (Gewichtsanteil)	Araldit F (100)	Araldit F (100)	CY 5622 (100)	Araldit F (100)
<b>Härter</b> (Gewichtsanteil)	HT 907 (75)	HY 905 (100)	XW 1235 (82)	HY 905 (100)
<b>Beschleuniger</b> (Gewichtsanteil)	DY 061 (1)	DY 061 (1)	DY 062 (0,45)	DY 061 (1)
<b>Flexibilisator</b> (Gewichtsanteil)	—	DY 040 (10)	—	DY 040 (10)
<b>Füllstoff</b> (Gewichtsanteil)	W12 EST (320)	W12 EST (400)	W12 EST (340)	W12 EST (400)
<b>Einsatzgebiet</b>	Innenraum- anwendung	Innenraum- anwendung	Freiluft- anwendung	Experimentier- material
<b>Hydrophobie- klasse nach STRI [44]</b>	1	1	1	1
<b>statischer Randwinkel, V = 20 µl, doppelt destilliertes Wasser, U = 0 kV</b>	85°	95°	100°	120°

### 6.3 Durchführung der Untersuchungen

Zur Untersuchung singulärer Tropfen im elektrischen Feld werden diese mit einem definiertem Volumen und einer bekannten Volumenleitfähigkeit an ausgewählten Orten auf der Prüfkörperoberfläche plaziert. Für verschiedene Flüssigkeiten, die sich in ihrer Volumenleitfähigkeit unterscheiden, wird jeweils eine separate Glasspritze mit einem Kanüldurchmesser von 0,5 mm verwendet. Eine dieser Spritzen wird in der Halterung der Dosiereinrichtung des Randwinkel-Meßsystems befestigt. Die Spritze wird mit zwei Mikrometerschrauben, die mit Millimeterskalen versehen sind, in vertikaler und horizontaler Richtung exakt an eine oberhalb der Prüfkörperoberfläche gewünschte Position gebracht. Durch langsames Drehen an einer Mikrometerschraube der Dosiereinrichtung wird anhand der vorhandenen Skala die Flüssigkeitsmenge dosiert und an einer definierten Position auf der im feldfreien Zustand befindlichen Prüfkörperoberfläche abgesetzt. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurde in Vergleichsmessungen das dosierte Flüssigkeitsvolumen mit einer Präzisionswaage verifiziert, so daß das Flüssigkeitsvolumen der Glasspritzen genau und reproduzierbar mit der Mikrometerschraube anhand der dort vorhandenen Skala dosiert werden kann. Nach dem Aufbringen der singulären Tropfen wird die Dosiereinrichtung aus der optischen Achse des Randwinkel-Meßsystems geklappt und befindet sich während der Experimente in genügend großem Abstand vom Prüfkörper.

Die Prüfkörperoberfläche wird vor den Experimenten mit einem isopropanolgetränkten fusselfreien Tuch gereinigt, anschließend mit doppelt destilliertem Wasser abgespült und mit einem weiteren fusselfreien Tuch getrocknet. Mit einer Wasserwaage wird der Prüfkörper exakt horizontal ausgerichtet, so daß keine unerwünschten Beeinflussungen durch eine Neigung der Oberfläche entstehen. Die optischen Einrichtungen werden ebenfalls mit einer Wasserwaage ausgerichtet. Zur Vermeidung mechanischer Erschütterungen besteht zwischen den optischen Aufnahmesystemen mit Prüfkörper und der Bedieneinheit des Versuchstandes eine mechanische Entkopplung, so daß während der Experimente Einflüsse durch mechanische Erschütterungen ausgeschlossen werden können. Außerdem wird

während der Durchführung der Experimente darauf geachtet, daß keine umgebende bewegte Luft die Tropfen auf der Prüfkörperoberfläche verändert.

Für alle Untersuchungen werden der Probentisch und die Dosiereinrichtung des Randwinkel-Meßsystems verwendet, unabhängig davon, mit welchem Videoaufnahmesystem gearbeitet wird. Die beiden digitalen Videokameras, nämlich die Kamera des Randwinkelsystems und die des Hochgeschwindigkeits-Kamerasystems, sind auf der optischen Achse des Randwinkel-Meßsystems gegenüberliegend installiert. Die unterschiedlichen Anforderungen während einer Aufnahme mit einem der Systeme erlaubt es nicht, beide Videosysteme gleichzeitig zu betreiben. Bei den Aufnahmen mit dem Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem ist ein heller Hintergrund notwendig, der durch ein weißes Papier hinter dem Prüfkörper realisiert wird. Das Papier befindet sich jedoch in der optischen Achse des Randwinkel-Meßsystems, so daß zur Zeit der Aufnahme mit dem Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem keine Aufnahmen mit dem zweiten System durchgeführt werden können.

Vor und nach den Experimenten wird mit dem verwendeten Aufnahmesystem ein digitales Bild von den untersuchten Tropfen festgehalten, um eine Veränderung der Isolierstoffoberfläche durch das Experiment kontrollieren zu können. Nach mehrmaliger Beanspruchung eines Prüfkörpers ist es notwendig, den Prüfkörper durch einen neuen zu ersetzen, da sich die Prüfkörpereigenschaften durch die Anwesenheit der Tropfen im elektrischen Feld und eventuell durch den vor jedem Experiment durchgeführten Reinigungsvorgang verändern. Diese Veränderung kann anhand der Tropfenform und des Randwinkel im spannungslosen Zustand festgestellt werden. Die Experimente werden für jede Parameterkombination fünffach durchgeführt, um eine Reproduzierbarkeit der Beobachtungen zu gewährleisten.

Die Dauer der Experimente beträgt für die Untersuchungen mit der Hochgeschwindigkeitskamera zwei Sekunden und für Untersuchungen mit dem Randwinkel-Meßsystem bis zu einigen Stunden. Bei den Aufnahmen mit dem Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem befinden sich der Hochspannungsanschluß auf der rechten Seite und der Erdanschluß auf der linken Seite der Bildaufnahmen. Da die Kamera des Randwinkel-Meßsystems von der gegenüberliegenden Seite den Prüfkörper fokussiert, sind die beiden Anschlüsse in den aufgenommenen Bildern

entsprechend vertauscht. Bei beiden Systemen erscheint die x-Achse des definierten Koordinatensystems auf dem Modellprüfkörper als Horizontale in der Bildaufnahme. Die positive y-Achse des Koordinatensystems zeigt in Richtung der montierten Videokamera des Randwinkel-Meßsystems. Die Aufnahmen des Hochgeschwindigkeits-Kamerasystems werden im Nulldurchgang der anliegenden Hochspannung mit darauffolgender positiver Steigung des sinusförmigen Spannungsverlaufes gestartet. Die Hochspannung wird sprungartig eingeschaltet, so daß keine Vorbelastungen des Tropfens durch eine Spannungssteigerung bis zur gewünschten Spannungshöhe entstehen. Die dynamischen Eigenschaften der Spannungserzeugung erlauben bei einem Einschaltvorgang eine reproduzierbare Hochspannung, deren Verlauf für einen Einschaltvorgang und anschließendem Ausschaltvorgang bei gleichzeitig angeschlossenem Prüfkörper in Bild 6.2 dargestellt ist. Das Einschalten der Hochspannung erfolgt sprungartig durch einen manuellen Triggerimpuls am Funktionsgenerator. Wie in Bild 6.2 dargestellt, benötigt das System nach einem Einschalten der Hochspannung etwa drei Perioden der sinusförmigen Wechselspannung für das Erreichen einer Wechselspannung konstanter Amplitude und konstanter Frequenz. Es ergibt sich ein stabiler reproduzierbarer Nulldurchgang mit positiver Steigung nach 54 ms. Dieser ist der Startzeitpunkt der Videoaufnahmen.

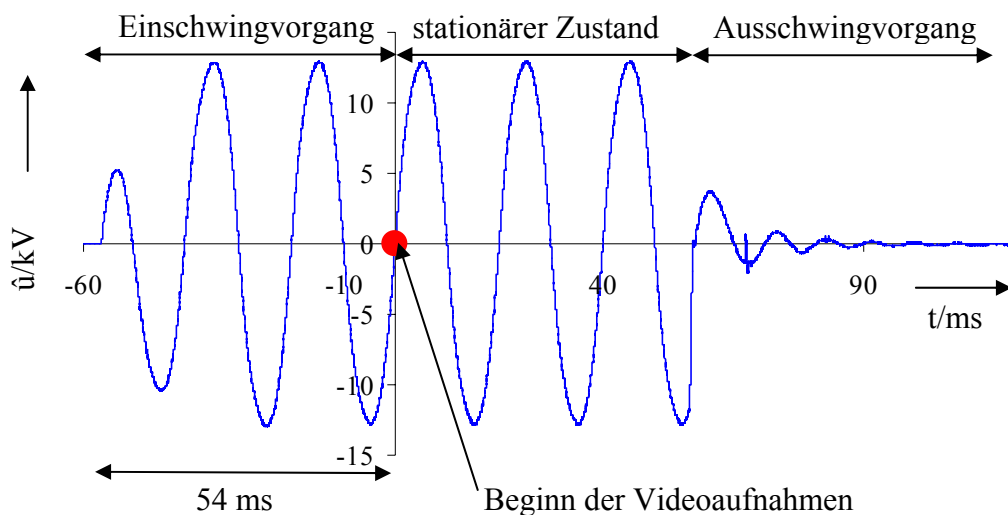


Bild 6.2: Dynamisches Verhalten des Systems der Spannungserzeugung bei einem Ein- und Ausschaltvorgang der Hochspannung

## 6.4 Phänomene an singulären Tropfen im elektrischen Feld

### 6.4.1 Verdunstungsvorgänge

Infolge von Verdunstungsvorgängen eines Wassertropfens, einem Volumenprozeß, bei dem Moleküle der flüssigen Phase in die gasförmige Phase übergehen, verändert sich in Abhängigkeit der Zeit die Tropfenform. Dabei nimmt die Höhe des Tropfens ab und die Bogenlänge des Tropfenprofils verringert sich. Da der Tropfendurchmesser zunächst konstant bleibt, reduzieren sich kontinuierlich die Randwinkel des Tropfens an den Tripelpunkten. **Bildsequenz 1** im Anhang verdeutlicht diesen Vorgang an einem Tropfen mit einem Volumen von 100 µl auf der Isolierstoffoberfläche von Material 1 ohne Spannungsbeanspruchung.

Zur Untersuchung der Verdunstung [109] an singulären Tropfen zunächst ohne Spannungsbeanspruchung werden für drei unterschiedliche Volumina die Veränderungen des Randwinkels in Abhängigkeit der Verdunstungszeit mit dem Randwinkel-Meßsystem aufgenommen. Es wird jeweils ein Tropfen auf der Isolierstoffoberfläche von Material 1 aufgebracht und in Sekundenintervallen der Randwinkel mit dem Programm Drop Shape Analysis des Meßsystems ermittelt. Da es sich hierbei um einen symmetrischen Vorgang am Tropfen handelt, bei dem sich der Randwinkel am rechten und linken Tripelpunkt im gleichen Betrag verändert, wird der Mittelwert von diesen beiden Randwinkeln in Bild 6.3 dargestellt. Die drei Tropfen mit den Volumen  $V_1 = 14 \mu\text{l}$ ,  $V_2 = 34 \mu\text{l}$  und  $V_3 = 36 \mu\text{l}$  bestehen aus doppelt destilliertem Wasser und befinden sich jeweils auf der Prüfkörperoberfläche von Material 1. Die in Bild 6.3 dargestellten Meßwerte gelten für die Umgebungsbedingungen bei einer Temperatur von  $\vartheta = 24^\circ \text{C}$ , einem Luftdruck von  $p = 1010 \text{ hPa}$  und einer relativer Luftfeuchte von  $r.F. = 65\%$ . Die Untersuchungen zeigen für die drei Tropfenvolumen eine abnehmende Tendenz ihres Randwinkels innerhalb weniger Sekunden. Nach 10 Minuten hat sich der Randwinkel bis zu  $\Delta\Theta = 8^\circ$  verringert, was eine Veränderung von etwa 10 % bezüglich des Randwinkels vor Versuchsbeginn bedeutet. Bei der Anwesenheit eines elektrischen Feldes wird der Verdunstungsvorgang geringfügig beschleunigt.

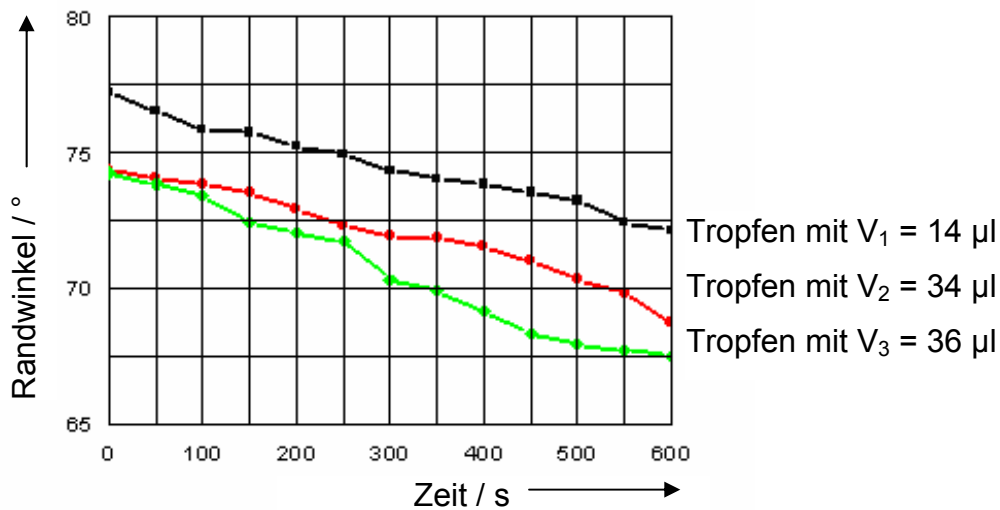


Bild 6.3: Zeitabhängigkeit der Randwinkel bei einem Verdunstungsvorgang

Physikalisch wirkt der Verdunstung der Vorgang der Adsorption entgegen, d.h. der Anlagerung von Wassermolekülen aus dem umgebenden Gas. Mit den hier durchgeführten Messungen kann nur die Überlagerung der Vorgänge aus der Verdunstung und der Adsorption festgestellt werden. Diese Vorgänge sind bei allen hier vorgestellten Tropfenuntersuchungen immer präsent und überlagern sich den anderen beobachteten Phänomenen an Tropfen.

Die Meßergebnisse aus den Experimenten zur Untersuchung des Verdunstungsverhaltens begründen eine nach der Plazierung auf der Isolierstoffoberfläche möglichst ohne Zeitverzögerung beginnende Untersuchung der Tropfen. Dies gilt für Langzeituntersuchungen mit dem Randwinkel-Meßsystem wie auch für Kurzzeituntersuchungen mit dem Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem. Bei letzterem liegen zwar sehr kurze Aufnahmezeiten von maximal zwei Sekunden vor, da aber hiermit volumenabhängige Phänomene im Millisekundenbereich untersucht werden, können Verdunstungsvorgänge das Tropfenverhalten beeinflussen. Die benötigte strahlungsintensive Beleuchtung für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen begünstigt ebenfalls den Verdunstungsvorgang, so daß die Halogenlampe erst unmittelbar vor der Aufnahme der Videosequenzen eingeschaltet wird.



### 6.4.2 Strukturen auf der Tropfenoberfläche

Bei einer am Prüfkörper angelegten hohen Wechselspannung beginnen Tropfen ab einer bestimmten Spannungshöhe mechanische Schwingungen auszuführen. Dabei entstehen auf der Flüssigkeitsoberfläche charakteristische Strukturen, die sich innerhalb einer Spannungsperiode ändern und sich teilweise in aufeinanderfolgenden Spannungsperioden wiederholen. Diese sehr schnellen Veränderungen können mit dem Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem aufgenommen werden. Die Strukturen auf der Tropfenoberfläche sind bei den Untersuchungen für die meisten Parameterkombinationen reproduzierbar. In Bild 6.4 ist ein Tropfen aus doppelt destilliertem Wasser mit einem Volumen von 100  $\mu\text{l}$  ohne Spannungsbeanspruchung und bei Spannungsbeanspruchung mit  $\hat{u} = 13 \text{ kV}$  in der Position  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$  auf Material 1 mit einer transienten ausgeprägten Oberflächenstruktur dargestellt. Aufgrund optischer Reflexionen auf der Oberfläche der Isolierstoffe ist der Verlauf der horizontalen Feststoffoberfläche nur undeutlich zu erkennen. Dies ist bei den farbigen Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera besonders ausgeprägt. Ein weiterer Grund für eine undeutliche Abgrenzung der Feststoffoberfläche liegt an der Fokussierung der beiden digitalen Kameras. Diese sind auf den singulären Tropfen fokussiert und nicht auf die weiter im Vordergrund liegende Feststoffkante des Modellprüfkörpers. Die Feststoffoberfläche kann jedoch an den Ausprägungen der Tripelpunkte in den Aufnahmen erkannt werden. Die Prüfkörperoberfläche ist in Bild 6.4 eingezeichnet, wird aber in weiteren Bildaufnahmen nicht gezeigt.

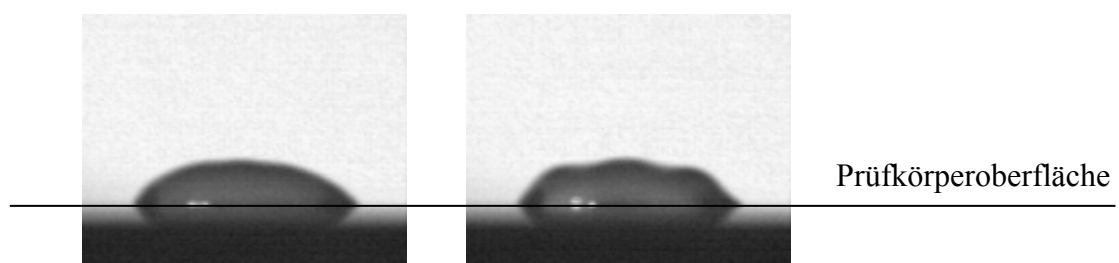


Bild 6.4: Oberflächenstrukturen bei einem unbeanspruchten und bei einem spannungsbeanspruchten Tropfen [110]

In **Bildsequenz 2** werden charakteristische Strukturen auf einer Tropfenoberfläche innerhalb einer halben Spannungsperiode gezeigt. Dabei entspricht der Beginn der dargestellten Aufnahme bei  $t = 0$  ms einem Spannungsnulldurchgang einer sinusförmigen Spannung mit  $\hat{u} = 13$  kV und  $f = 50$  Hz, die bei  $t = 5$  ms ihren positiven Amplitudenwert und bei  $t = 15$  ms ihren negativen Amplitudenwert erreicht. Dargestellt ist ein Tropfen aus doppelt destilliertem Wasser mit einem Volumen von  $100\text{ }\mu\text{l}$  in der Position  $x = 0$  mm,  $y = 0$  mm auf Material 1.

**Bildsequenz 3** zeigt an einem Tropfen aus doppelt destilliertem Wasser auf einer Prüfkörperoberfläche des Materials 1 die Reproduzierbarkeit der aufgenommenen Oberflächenstrukturen in mehreren Spannungsperioden. Der Tropfen ist mit seinem Tropfenmittelpunkt bei  $x = 0$  mm,  $y = 0$  mm platziert und hat ein Volumen von  $50\text{ }\mu\text{l}$  aus doppelt destilliertem Wasser. Die Aufnahmen zeigen sich wiederholende charakteristische Strukturen, die bestimmten Zeitpunkten einer Spannungsperiode zugeordnet werden können. Die Oberflächenstrukturen wiederholen sich dabei zweimal innerhalb einer Spannungsperiode. Ein Vergleich der **Bildsequenz 2** mit der **Bildsequenz 3** verdeutlicht, daß die Ausprägungen der Oberflächenstrukturen vom Volumen des singulären Tropfens abhängig sind. Die Materialeigenschaften beeinflussen ebenfalls die Oberflächenstrukturen, da sich auf unterschiedlichen Feststoffoberflächen aufgrund der unterschiedlichen Grenzflächenkräfte verschiedene Tropfenformen ausbilden, die unterschiedliche Schwingungseigenschaften besitzen. Auch sind die Oberflächenstrukturen von der Frequenz der anliegenden Hochspannung abhängig. Die Frequenzabhängigkeit wird in **Bildsequenz 4** an einem Tropfen mit einem Volumen von  $100\text{ }\mu\text{l}$  bei einer angelegten Spannung von  $\hat{u} = 11$  kV und einer Frequenz von  $200$  Hz deutlich. Es entstehen in den ersten Spannungsperioden unregelmäßige Muster auf der Tropfenoberfläche, die sich nach etwa  $240$  ms als hochfrequente Oberflächenstrukturen geringer Amplitude stabilisieren.

In **Bildsequenz 5** werden zwei gleichzeitig spannungsbeanspruchte singuläre Tropfen gleichen Volumens von jeweils  $50\text{ }\mu\text{l}$  gezeigt. Die beiden Tropfen sind symmetrisch bezüglich der  $z$ -Achse des Koordinatensystems auf der Prüfkörperoberfläche des Materials 1 platziert und haben eine Volumenleitfähigkeit von  $\kappa = 10000\text{ }\mu\text{S/cm}$ . Sie befinden sich mit ihren Mittelpunkten an den Positionen

$x_1 = -5 \text{ mm}$ ,  $y_1 = 0 \text{ mm}$  und  $x_2 = +5 \text{ mm}$ ,  $y_2 = 0 \text{ mm}$ . Die Aufnahmen zeigen bei einer anliegenden Wechselspannung von  $\hat{u} = 13 \text{ kV}$  und  $f = 50 \text{ Hz}$  in Abhängigkeit der Phasenlage der Spannung wiederkehrende Oberflächenstrukturen, die bei beiden Tropfen zeitgleich und mit gleicher Intensität ausgeführt werden. Bei  $t = 35 \text{ ms}$  liegt die maximale positive Spannung an, bei  $t = 40 \text{ ms}$  durchläuft die Spannung den Nulldurchgang, und bei  $t = 45 \text{ ms}$  erreicht sie den maximal negativen Spannungswert. Die Tropfen zeigen sowohl im positiven als auch negativen Spannungsmaximum gleiche Oberflächenstrukturen mit einer maximalen Tropfenhöhe in der Mitte der Tropfen. Im Spannungsnulldurchgang nehmen sie eine Form an, vergleichbar mit einer Tropfenform im spannungslosen Zustand. Tropfen aus doppelt destilliertem Wasser ohne eine Zugabe von Natriumchlorid zeigen bei sonst identischen Parametern ähnliche Oberflächenstrukturen.

Mit den entstehenden Oberflächenstrukturen ändert sich auch dynamisch der Randwinkel innerhalb einer Spannungsperiode in dem Bereich zwischen Vorzugs- und Rückzugswinkel. Dies wird in **Bildsequenz 6** dargestellt.

Die maximal mögliche Verformung eines Tropfens ist bei einem auftreffenden Tropfen auf eine spannungslose Isolierstoffoberfläche zu beobachten. In **Bildsequenz 7** und **Bildsequenz 8** ist ein Auftreffvorgang für jeweils einen Tropfen dargestellt. Beim Auftreffen sind mechanische Schwingungen mit charakteristischen symmetrischen Verformungen deutlich erkennbar und ähnlich ausgeprägt wie bei der Beanspruchung mit Wechselspannung. Der kleinere der beiden Tropfen in **Bildsequenz 7** bildet sich nach dem Auftreffvorgang in eine Form zurück, die mit einem aufgesetzten Tropfen mit gleichen Parametern vergleichbar ist. Zum Vergleich ist ein aufgesetzter Tropfen in den Bildern am rechten Rand zu sehen. Der größere Tropfen in **Bildsequenz 8** hingegen bildet eine flachere Form aus als ein im Vergleich aufgesetzter Tropfen gleichen Volumens. Beide Tropfen in **Bildsequenz 7** und **Bildsequenz 8** bilden unterschiedliche Strukturen auf ihren Oberflächen aus, bedingt durch die unterschiedlichen Volumen und somit unterschiedlichen Bogenlängen der Tropfenprofile.

Das Verhalten von Tropfen auf Material 4 mit einer Beschichtung, die auf dem Lotuseffekt beruht, ist verschieden von den bisher beschriebenen Verformungen. Ein Tropfen aus doppelt destilliertem Wasser mit einem Volumen von  $100 \mu\text{l}$  zeigt bei

sonst unveränderten Parametern im Vergleich zu **Bildsequenz 2** keine typischen transienten Oberflächenstrukturen. Vielmehr führt ein geringer oberer Teil des Tropfens eine kaum sichtbare horizontale Rechts-Links-Bewegung aus. Dabei verändert sich kaum seine elliptische Grundform auf der Isolierstoffoberfläche. Bei einem Tropfen aus doppelt destilliertem Wasser mit einem Volumen von  $10\ \mu\text{l}$  konnte bei einer Spannungsbeanspruchung mit  $\hat{u} = 13\ \text{kV}$  diese typische horizontale Rechts-Links-Bewegung des Tropfens deutlich beobachtet werden, wie in **Bildsequenz 9** dargestellt. Dabei sind die Tripelpunkte des singulären Tropfens ortsfest, während periodische Bewegungen nur im oberen Teil des Tropfens ausgeführt werden.

Charakteristische Strukturen bei der Beanspruchung mit Wechselspannung ergeben sich auch während eines Abfließvorgangs eines singulären Tropfens auf einer geneigten Isolierstoffoberfläche. In **Bildsequenz 10** ist ein Abrollvorgang für einen Tropfen aus doppelt destilliertem Wasser mit einem Volumen von  $50\ \mu\text{l}$  dargestellt. Der zunächst ortsfeste Tropfen beginnt bei der Anwesenheit eines elektrischen Wechselfeldes mit  $\hat{u} = 13\ \text{kV}$  Strukturen auf der Oberfläche auszubilden. Dabei ändern sich gleichzeitig Vorrückwinkel  $\Theta_{\text{vor}}$  und Rückzugswinkel  $\Theta_{\text{rück}}$  des Tropfens. Das elektrische Wechselfeld begünstigt ein Abrollen des zuvor formstabilen Tropfens. Während des Abrollvorganges zeigt der Tropfen ebenfalls wellenförmige Strukturen auf seiner Oberfläche.

Alle Tropfen auf Material 4 rollen bei geringeren Neigungswinkeln des Prüfkörpers ab als bei den drei weiteren Materialien. Dies beruht wahrscheinlich auf den wesentlich größeren Randwinkeln, so daß der Tropfen bei Einwirkung der Gravitationskraft leichter in Bewegung versetzt wird. Beim Abrollvorgang hinterlassen Tropfen auf Material 4 kaum eine Feuchtespur.

Im Gegensatz zu dem beschriebenen Tropfenverhalten im elektrischen Wechselfeld verhalten sich Tropfen in einem hohen Gleichfeld auf einer horizontalen Prüfkörperoberfläche formstabil und führen keine periodischen Bewegungen bezüglich ihrer Oberfläche aus.

### 6.4.3 Höhenänderungen des Tropfenscheitelpunktes

Beim Einschalten einer Hochspannung verringert sich die Tropfenhöhe sowohl im Gleich- als auch im Wechselfeld als einmaliger Vorgang. Danach setzen die in dieser Arbeit beschriebenen Phänomene an Tropfen ein. Bei der Beanspruchung mit Wechselspannung resultiert eine geometrische Änderung des Tropfenscheitelpunktes aus den sich bildenden Oberflächenstrukturen auf singulären Tropfen. Der Tropfenscheitelpunkt, der höchste Punkt in der Mitte des Tropfens in feldfreier Umgebung, führt bei Beanspruchung mit Wechselspannung infolge der zeitlichen Änderungen der Oberflächenstrukturen der Flüssigkeit im elektrischen Wechselfeld Schwingungsbewegungen aus. Die relative Höhenänderung, d.h. die Differenz zwischen der Höhe vor dem Anlegen der Spannung und der Höhe zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Spannungsbeanspruchung, hängt vom Tropfenvolumen, dem Material, der Höhe der Wechselspannung und deren Frequenz ab. In **Bildsequenz 2** besteht zwischen der minimalen und maximalen Tropfenhöhe ein Zeitintervall von 5 ms bei einer Wechselspannung mit einer Frequenz von  $f = 50$  Hz. Die maximale Tropfenhöhe tritt zum Zeitpunkt der maximal anliegenden Spannung sowohl in der positiven als auch negativen Halbwelle auf. So ändert sich bei einem symmetrischen Verhalten der Tropfen bezüglich der Tropfenmitte die Tropfenhöhe in doppelter Frequenz der anliegenden Wechselspannung. In **Bildsequenz 3** nimmt die Intensität der Oberflächenstrukturen mit fortschreitender Dauer der Spannungsbeanspruchung zu. Dies geschieht infolge eines Einschwingvorganges, der in Abhängigkeit des Tropfenvolumens von wenigen Millisekunden bis zu einigen 100 Millisekunden dauern kann. Bei sich bezüglich der Tropfenmitte unsymmetrisch verhaltenden Tropfen kann sich die Tropfenhöhe mehrfach innerhalb einer Spannungshalbschwingung ändern, wie dies in **Bildsequenz 4** im Zeitintervall von 5 ms bis 40 ms zu erkennen ist.

Bei der Beanspruchung mit hoher Gleichspannung, bei der sich typischerweise keine Oberflächenstrukturen bilden, kann sich die Tropfenhöhe infolge des Feldeinflusses verringern. Diese reduzierte Tropfenhöhe bleibt bei anliegender Gleichspannung konstant und kehrt wieder in ihren ursprüngliche Zustand zurück, falls am Tropfen keine weiteren Veränderungen infolge der Spannungsbeanspruchung stattfinden.

#### 6.4.4 Bewegungen der Tripelpunkte

Die Tripelpunkte eines Tropfens an der Phasengrenze Feststoff – Flüssigkeit – Gas können sich aufgrund einer Feldbeanspruchung auf der Feststoffoberfläche bewegen. Sowohl bei Wechsel- als auch bei Gleichspannung ist eine Bewegung der Tripelpunkte in Richtung des elektrischen Feldverlaufes feststellbar. Die an den Tripelpunkten wirkenden Kräfte ziehen den Tropfen in Richtung der gasförmigen Tropfenumgebung auf der Isolierstoffoberfläche auseinander, so daß aus der ursprünglich kreisförmigen Grundfläche des Tropfens eine elliptische Grundfläche mit der größeren Halbachse in Feldrichtung hervorgeht. Die große Halbachse der Ellipse entspricht der x-Achse des auf der Prüfkörperoberfläche definierten Koordinatensystems. Infolge der Vergrößerung des Tropfendurchmessers in der großen Halbachse der ellipsenförmigen Grundfläche des Tropfens und unter Beibehaltung des Durchmessers der kleineren Ellipsenhalbachse verringert sich die Höhe des Tropfens bei konstant angenommenem Volumen.

Die Bewegung der Tripelpunkte auf der Isolierstoffoberfläche kann auf sehr unterschiedliche Weise erfolgen. Im Gleichfeld ist dieser Vorgang meist eine sehr ruckartige Bewegung. Die Ausdehnung des Tropfens kann sich dabei in zeitlichen Abständen gleichzeitig am rechten und linken Tripelpunkt ändern oder sich zeitlich abwechselnd an den beiden in Feldrichtung befindlichen Tropfenrändern vollziehen. Bei der Beanspruchung eines Tropfens mit Wechselspannung ist der Vorgang der Tripelpunktbewegung sehr vielfältig. Im Vergleich zur Beanspruchung mit Gleichspannung ist der Bewegungsablauf in Form einer kontinuierlichen Verschiebung oder in Form einer Schwingungsbewegung sehr viel komplexer. Die Bewegung der Tripelpunkte kann eine periodische oszillierende Bewegung bezüglich der x-Koordinate sein, kann ein einmaliger Vorgang sein, kann sprunghaft einmalig oder mehrmalig erfolgen oder kann kontinuierlich als langsame Bewegung festgestellt werden. Es ist zwischen Tripelpunktbewegungen innerhalb einer Spannungsperiode und Tripelpunktverschiebungen über mehrere Spannungsperioden zu unterscheiden. Mit dem Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem können Änderungen der Tripelpunkte innerhalb einer Spannungsperiode festgehalten werden, während die langsame kontinuierliche Verschiebung der Tripelpunkte im Minutenbereich mit dem Randwinkel-Meßsystem aufgenommen werden kann. Die

Bewegung der Tripelpunkte in Feldrichtung ist u.a. von den Materialeigenschaften abhängig. Ein weiterer Einflußparameter ist die Viskosität der Flüssigkeit, wie in [45] festgestellt. Für die Materialien 1, 2 und 3 sind in Bild 6.5 Momentaufnahmen von jeweils einem Tropfen aus doppelt destilliertem Wasser mit einem Volumen von  $100\text{ }\mu\text{l}$  bei Beginn der Spannungsbeanspruchung und nach 60 ms miteinander verglichen. Ein Vergleich der Tropfendurchmesser zeigt die unterschiedlichen Verschiebungen der Tripelpunkte innerhalb des Zeitintervalls. Der Tropfen auf Material 1 mit dem größten Tropfendurchmesser aufgrund geringer Hydrophobie verformt sich in Feldrichtung weniger als der Tropfen auf dem hydrophoberen Material 3.

Im Gegensatz hierzu sind die Tripelpunkte der Tropfen auf dem superhydrophoben Material 4 weitgehend ortsfest. Voraussetzung hierfür sind keine benachbarten Tropfen in unmittelbarer Umgebung im elektrischen Wechselfeld.

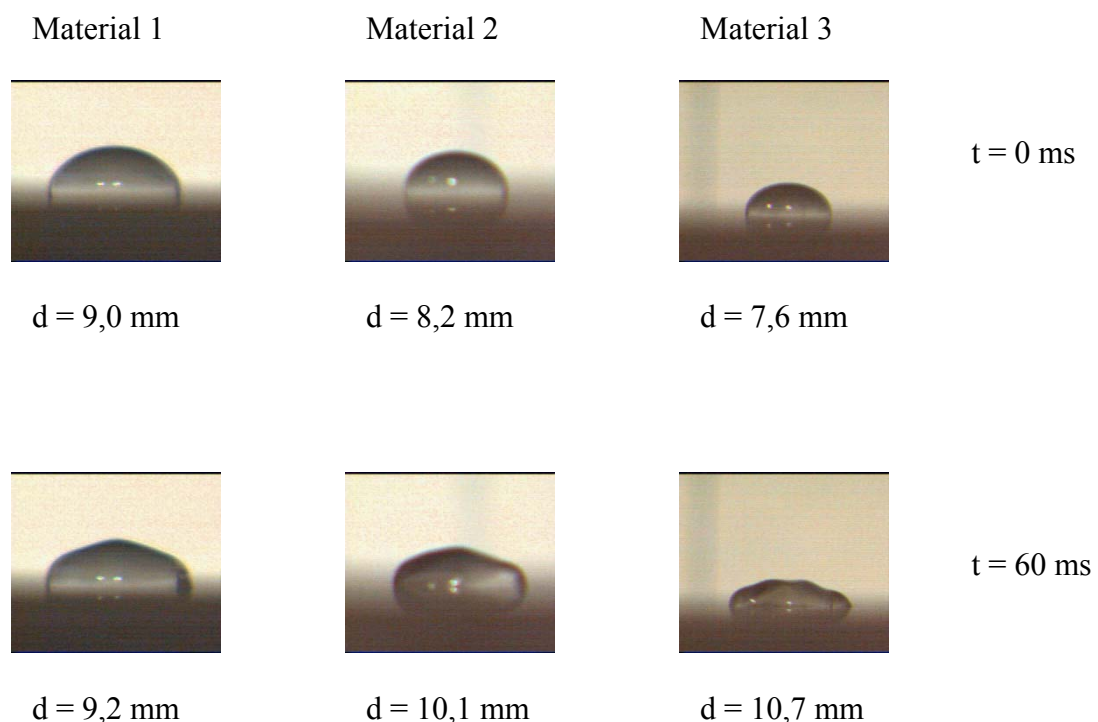


Bild 6.5: Zeitliche Bewegung der Tripelpunkte in Abhängigkeit des Materials  
 $V = 100\text{ }\mu\text{l}$ , doppelt dest.  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $x = 0\text{ mm}$ ,  $y = 0\text{ mm}$ ,  
 $\hat{u} = 13\text{ kV}$ ,  $f = 50\text{ Hz}$

Bei einer Belastung mit hoher Gleichspannung sind keine transienten zeitveränderlichen Strukturen auf der Flüssigkeitsoberfläche eines Tropfens feststellbar. Es ändert sich jedoch die Form des Tropfens im Gleichfeld, wie in Bild 2.4 dargestellt. Diese ruckartigen Bewegungen geschehen sehr plötzlich in unregelmäßigen zeitlichen Abständen. Nach einer Bewegung bleibt die Form des Tropfens unverändert, bis dieser sich nach Sekunden oder Minuten erneut verformt. Auf diese Weise wandern die Tripelpunkte des Tropfens, so daß die Fläche der mit Flüssigkeit bedeckten Isolierstoffoberfläche zunimmt.

#### 6.4.5 Flüssigkeitsspuren zwischen Tropfen

Eine besondere Ausprägung der Tripelpunktbewegung ist die Ausbildung von Flüssigkeitsspuren, die aufgrund einer Instabilität aus konischen Spitzen an den Tropfenrändern in Feldrichtung entstehen. Diese haben bei Anwesenheit mehrerer Tropfen auf der Isolierstoffoberfläche große Bedeutung. Bei zwei nahe zueinander platzierten Tropfen auf einer horizontalen Isolierstoffoberfläche kann sich zwischen ihren zueinander gerichteten Tripelpunkten eine Flüssigkeitsspur bilden, ohne daß sich die Tropfen vereinigen. Die Ausbildung der Flüssigkeitsspuren erfolgt im allgemeinen in Richtung des von außen angelegten Feldes, kann aber auch orthogonal dazu bei der Anordnung mehrerer Tropfen in einer Matrixform mit neun Tropfen von jeweils drei Tropfen in einer Reihe beobachtet werden.

Ausgebildete Flüssigkeitsspuren sind sehr deutlich bei der Beanspruchung mit Wechselfeld feststellbar und sind u.a. abhängig von der Höhe der Spannung und dem Abstand der beiden Tropfen zueinander. Die Flüssigkeitsspur bleibt auch nach Abschaltung der Hochspannung zwischen den Tropfen bestehen oder verändert sich während der Spannungsbeanspruchung in ihrer Form. Eine ununterbrochene Flüssigkeitsspur wird im folgenden als Wasserpfad bezeichnet.

Flüssigkeitsspuren und Wasserpfade können sich sowohl zwischen zwei Tropfen gleicher als auch unterschiedlicher Parameter bilden. **Bildsequenz 11** zeigt diesen Vorgang für zwei Tropfen aus doppelt destilliertem Wasser mit einem Volumen von jeweils 100 µl auf Material 2. Die Tropfen sind symmetrisch bezüglich der z-Koordinate angeordnet. Ihre zueinander gerichteten Tripelpunkte haben einen Abstand von 1 mm. In **Bildsequenz 12** bildet sich zwischen zwei ungleich großen



Tropfen ein Wasserpfad, der nach  $t = 1420$  ms deutlich zu erkennen ist, aber auch schon vor dieser Zeit bestand und sich zeitweise wieder zurückgebildet hatte. Der ursprünglich kleinere Tropfen mit einem Volumen von  $10\text{ }\mu\text{l}$  ist an der Stelle  $x = -5\text{ mm}$ ,  $y = 0\text{ mm}$  platziert, während sich der große Tropfen mit einem Volumen von  $100\text{ }\mu\text{l}$  bei  $x = +5\text{ mm}$ ,  $y = 0\text{ mm}$  zu Beginn der Spannungsbeanspruchung befindet. Nach dem gebildeten Wasserpfad bei  $t = 1420$  ms und einer Volumenvergrößerung des zuvor kleineren Tropfens bewegen sich die beiden umgebildeten Tropfen voneinander weg in entgegengesetzte Richtungen. Aus der verbleibenden Flüssigkeitsspur formiert sich nach der Separation der beiden Tropfen ein weiterer Tropfen geringeren Volumens. Dieser zieht die verbleibende Flüssigkeitsspur in seine Nähe und zeigt nach etwa 60 ms eine kugelförmige Gestalt. Die durch einen Einschnürungsvorgang eines zuvor bestehenden Wasserpfades entstandenen Tropfen werden, wie in [111] beschrieben, im folgenden als Satellitentropfen bezeichnet.

#### 6.4.6 Vereinigung von Tropfen

Anstelle eines Wasserpfades zwischen zwei benachbarten Tropfen kann auch eine Vereinigung der Tropfen stattfinden. Diese ist um so wahrscheinlicher, je näher die Tropfen zueinander platziert sind. Bei einem kritischen Abstand von zwei benachbarten Tropfen auf einer horizontalen Isolierstoffoberfläche kann ein neuer größerer Tropfen durch die Vereinigung der vorher separierten Tropfen entstehen. Dieser Vorgang ist auch bei einer Tropfenkette feststellbar, die aus singulären Tropfen besteht und parallel zu den Feldlinien angeordnet ist. Es bildet sich ein neuer größerer Tropfen, der sich an dem Ort der ursprünglichen Tropfen befindet.

Ein Vergleich zwischen Tropfen im Wechselfeld und im Gleichfeld zeigt, daß bei gleichen Tropfenabständen und sonst identischen Parametern die Tropfen im Wechselfeld eher eine Vereinigung durchführen als Tropfen im Gleichfeld. Experimente zeigen auch bei erhöhten Spannungswerten der Gleichspannung diese Tendenz. So bleiben Tropfen, die bei Wechselspannung mit  $\hat{u} = 13\text{ kV}$  zusammenfließen, ohne zuvor einen Wasserpfad zu bilden, bei einer Gleichspannung von  $u = 20\text{ kV}$  noch separiert.

**Bildsequenz 13** zeigt einen Vereinigungsvorgang für zwei Tropfen und **Bildsequenz 14** für drei benachbarte Tropfen in einer Reihe. Bei der Vereinigung der drei Tropfen in **Bildsequenz 14** sind die ursprünglichen Tropfen anhand der Oberflächenstruktur des neu entstandenen Tropfens noch sichtbar. Nach der Ausdehnung des neuformierten Tropfens infolge von Bewegungen der beiden Tripelpunkte findet eine Tropfenteilung statt.

#### 6.4.7 Tropfenteilungen

In sehr seltenen Fällen können Tropfenteilungen an singulären Tropfen beobachtet werden. Dabei entstehen auf einem singulären Tropfen Oberflächenwellen, wobei periodische Höhenänderungen mit sehr großen Unterschieden zwischen der maximalen und minimalen Tropfenhöhe entstehen. Zum Zeitpunkt der kurzzeitig erreichten minimalen Höhe kann eine Einschnürung mit darauffolgender Separation der beiden Tropfenhälften erfolgen, so daß sich der Tropfen teilt und zwei neue kleinere Tropfen mit etwa der Hälfte des vorherigen Volumens entstehen. Sind die Oberflächenwellen unsymmetrisch bezüglich der Tropfenmitte, kann dieser Vorgang auch an einer anderen Stelle des Tropfens eintreten, und es bilden sich zwei ungleich große Tropfen. Das Flüssigkeitsvolumen des ursprünglichen Tropfens kann sich bei einem Separationsvorgang geringfügig verringern, da bei dem Vorgang zwischen den beiden neu entstandenen Tropfen eine kleine Flüssigkeitsspur zurückbleiben kann.

Ein weiterer Vorgang einer Tropfenteilung wurde bereits in **Bildsequenz 11** und **Bildsequenz 12** gezeigt. Hier bilden sich aus zuvor vereinigten Tropfen wieder neue Tropfen infolge einer Separation. Dabei wird wie bei der Entstehung von Satellitentropfen aus einem Wasserpfad ein neuer Tropfen generiert, der aber ein größeres Volumen aufweist.

#### 6.4.8 Sprühtropfen

Bei sehr hohen elektrischen Feldstärken, hervorgerufen durch eine Wechselspannung oder Gleichspannung, kommt es gelegentlich zur Bildung von Sprühtropfen. Dies sind Tropfen mit geringem Flüssigkeitsvolumen, die sich spontan von der Tropfenoberfläche eines Haupttropfens ablösen und in unmittelbarer Nähe des ursprünglichen Tropfens auf der Isolierstoffoberfläche auftreffen. Durch die Bildung

eines oder mehrerer Sprühtropfen verringert sich das ursprüngliche Volumen des Haupttropfens. Danach besteht die Möglichkeit zur Bildung von Wasserpfaden zwischen dem Haupt- und Sprühtropfen oder zur Wiedervereinigung der Tropfen infolge eines sehr geringen Abstandes zueinander.

Im Gegensatz zu Satellitentropfen, die sich durch einen Einschnürvorgang eines Wasserpfades bilden, entstehen Sprühtropfen durch eine Instabilität innerhalb eines singulären Tropfens, der spontan einen oder mehrere Sprühtropfen von seiner Oberfläche ohne die Bildung einer Flüssigkeitsspur abstößt.

Bei den durchgeführten Untersuchungen werden, wie in [112] und [113] bereits beschrieben, Sprühtropfen an Tropfen beobachtet, die in einer Matrixanordnung auf der Prüfkörperoberfläche angeordnet sind. Bei einer Platzierung von neun Tropfen in einer Matrixform von jeweils drei Tropfen in einer Reihe ist der mittlere Tropfen, der von den acht weiteren Tropfen umgeben ist, am wenigsten elektrisch beansprucht. Dies wird aus seiner Formstabilität und seinen ortsfesten Tripelpunkten geschlossen. Bei den an den vier Eckpunkten der Anordnung platzierten Tropfen besteht die größte Wahrscheinlichkeit des Entstehens von Sprühtropfen. Da diese Tropfen ein sehr geringes Volumen haben, können sie kaum von den digitalen Kameras aufgenommen werden. Die Sprühtropfen werden somit meist erst nach der Durchführung der Experimente bei Betrachtung des Prüfkörpers wahrgenommen.

## 6.5 Oberflächenwellen-Einsetzspannung

### 6.5.1 Definition

Die Entstehung von Strukturen auf Tropfenoberflächen bei der Beanspruchung mit Wechsellspannung ist u.a. von der Höhe der anliegenden Hochspannung abhängig. Zur Beschreibung des Einsetzens dieser wellenförmigen Oberflächenstrukturen wurde in [114] eine Resonanzeinsetz-Spannung definiert. Aufgrund weiterer Meßergebnisse in späteren Untersuchungen scheint der Begriff Oberflächenwellen-Einsetzspannung treffender geeignet zu sein, da es mehrere Resonanzerscheinungen an einem Tropfen gibt, aber nur eine Spannungshöhe, bei der erstmalig wellenförmige reproduzierbare Oberflächenstrukturen einsetzen. Unterhalb dieser Spannung zeigt der Tropfen keine Oberflächenwellen. Seine Form gleicht der ohne Feldbeanspruchung.

Die Oberflächenwellen-Einsetzspannung  $U_{OE}$  ist die Amplitude der Wechsellspannung am Prüfkörper, bei der erstmalig transiente wiederkehrende Strukturen auf der Flüssigkeitsoberfläche eines Tropfens auftreten. Der Begriff „transient“ berücksichtigt die Veränderung der Oberflächenstrukturen innerhalb einer Spannungsperiode. Der Begriff „wiederkehrend“ deutet darauf hin, daß sich in aufeinanderfolgenden Spannungsperioden die Oberflächenstrukturen in festen Zeitintervallen wiederholen.

Die Oberflächenwellen-Einsetzspannung wird iterativ in mehreren Experimenten ermittelt, indem ein sprungförmiges Einschalten einer Wechsellspannung mit vorgegebener Amplitude und einer Frequenz von  $f = 50 \text{ Hz}$  erfolgt. Liegt bei dieser Spannungshöhe bereits eine Bildung von Oberflächenstrukturen vor, so ist im nächsten Experiment mit neuaufgesetztem Tropfen eine niedrigere Spannungsamplitude zu wählen. Falls diese Wechsellspannung dann keine Oberflächenstrukturen erzeugt, wird die Amplitude der Wechsellspannung im darauffolgenden Experiment um einen geringen Betrag erhöht. Diese Iteration wird solange durchgeführt, bis ein Spannungsamplitudenwert gefunden ist, bei dem erstmalig reproduzierbare Oberflächenstrukturen zu erkennen sind.

Eine kontinuierliche Spannungssteigerung bis zum Erreichen einer Oberflächenwellen-Einsatzspannung kann durch die Vorbelastung der Flüssigkeit beim Durchfahren niedrigerer Spannungsbereiche zu anderen Ergebnissen führen als mit der iterativen Methode in Einzelexperimenten.

### 6.5.2 Einflußgrößen

Zur Untersuchung der Oberflächenwellen-Einsatzspannung  $\hat{u}_{OE}$  werden singuläre Tropfen mit den Volumen 10  $\mu\text{l}$ , 25  $\mu\text{l}$ , 50  $\mu\text{l}$ , 75  $\mu\text{l}$  und 100  $\mu\text{l}$  aus doppelt destilliertem Wasser auf drei Epoxidharz-Formstoff-Materialien plaziert. Die Tropfen, die sich jeweils auf der Prüfkörperoberfläche bei  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$  befinden, werden mit einer sprungförmig eingeschalteten sinusförmigen Wechselspannung von  $\hat{u} = 13 \text{ kV}$  und  $f = 50 \text{ Hz}$  elektrisch belastet. In den Tabellen 6.4 und 6.5 wird eine Übersicht der untersuchten Parameter gegeben.

Tabelle 6.4: Parameter zur Untersuchung der Oberflächenwellen-Einsatzspannung an einem singulären Tropfen

Anzahl der Tropfen	Position (x/y) in mm	Volumen in $\mu\text{l}$	Flüssigkeit	$\hat{u} = 0...13 \text{ kV}$ , $f = 50 \text{ Hz}$		
				Material 1	Material 2	Material 3
1	(0/0)	10	H <sub>2</sub> O dest.	x	x	x
		25	H <sub>2</sub> O dest.	x	x	x
		50	H <sub>2</sub> O dest.	x	x	x
		75	H <sub>2</sub> O dest.	x	x	x
		100	H <sub>2</sub> O dest.	x	x	x
	(5/0)	10	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		25	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		50	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		75	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		100	H <sub>2</sub> O dest.		x	
	(-5/0)	10	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		25	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		50	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		75	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		100	H <sub>2</sub> O dest.		x	

Tabelle 6.5: Parameter zur Untersuchung der Oberflächenwellen-Einsatzspannung an mehreren singulären Tropfen

Anzahl der Tropfen	Position (x/y) in mm	Volumen in $\mu\text{l}$	Flüssigkeit	$\hat{u} = 0...13 \text{ kV}, f = 50 \text{ Hz}$		
				Material 1	Material 2	Material 3
2 gleiche Tropfen	(7,5/0) / (0/0)	10	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		25	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		50	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		75	H <sub>2</sub> O dest.		x	
	(7,5/0) , (-5/0)	10	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		25	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		50	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		75	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		100	H <sub>2</sub> O dest.		x	
	(7,5/0) , (-7,5/0)	10	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		25	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		50	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		75	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		100	H <sub>2</sub> O dest.		x	
	(5,0) , (-5/0)	10	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		25	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		50	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		75	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		100	H <sub>2</sub> O dest.		x	
	(-7,5/0) , (0/0)	10	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		25	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		50	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		75	H <sub>2</sub> O dest.		x	
2 ungleiche Tropfen	10 $\mu\text{l}$ bei (5/0) großer Tropfen bei (-5/0)	25	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		50	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		75	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		100	H <sub>2</sub> O dest.		x	
	10 $\mu\text{l}$ bei (-5/0) großer Tropfen bei (5/0)	25	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		50	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		75	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		100	H <sub>2</sub> O dest.		x	
3 gleiche Tropfen	(5/0) , (0/0) , (-5/0)	10	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		25	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		50	H <sub>2</sub> O dest.		x	
	(7,5/0) , (0/0) , (7,5/0)	10	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		25	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		50	H <sub>2</sub> O dest.		x	
		75	H <sub>2</sub> O dest.		x	

Der Einfluß des Volumens auf die Oberflächenwellen-Einsetzspannung wird in Bild 6.6 gezeigt. Die eingetragenen Balken weisen auf die Schwankungen der Meßergebnisse hin. Die Untersuchungen zeigen eine Abhängigkeit zwischen der Oberflächenwellen-Einsetzspannung und der Hydrophobieeigenschaft des Materials bei verschiedenen Tropfenvolumen. Beim Vergleich von Material 1, Material 2 und Material 3 ist die Oberflächenwellen-Einsetzspannung am höchsten bei dem am geringsten hydrophoben Material 1 und am niedrigsten bei dem sehr hydrophoben Material 3 bei gleichen Tropfenparametern. Die Oberflächenwellen-Einsetzspannung nimmt bei einer Erhöhung des Tropfenvolumens bei allen drei untersuchten Materialien ab.

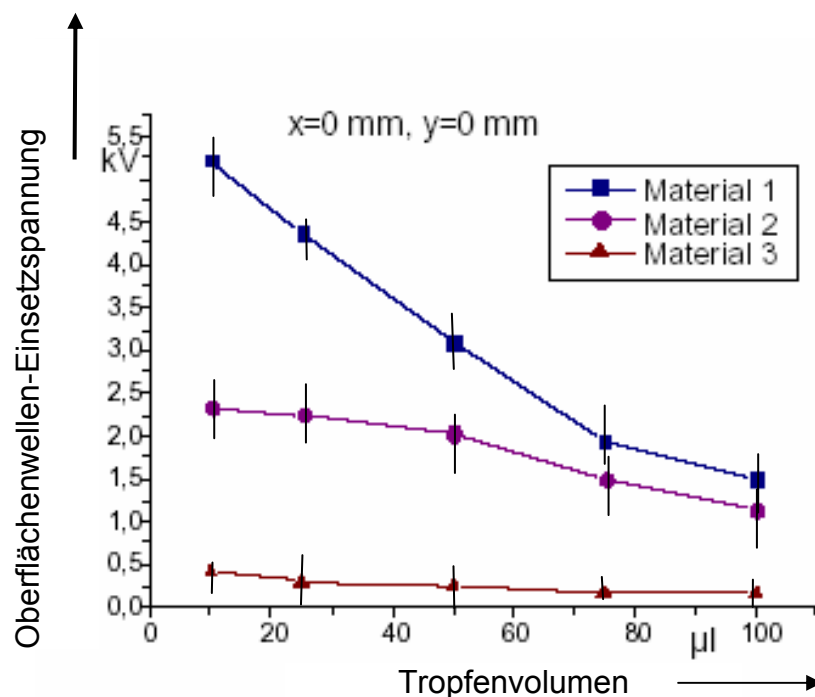


Bild 6.6: Oberflächenwellen-Einsetzspannung für drei Epoxidharz-Formstoffsysteme in Abhängigkeit des Tropfenvolumens

Bei einer Erhöhung der Tropfenzahl zeigen die Untersuchungen eine Abnahme der Oberflächenwellen-Einsetzspannung. In Bild 6.7 ist diese Tendenz für einen Tropfen an der Position  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$ , für zwei Tropfen bei  $x_1 = 0 \text{ mm}$ ,  $y_1 = 0 \text{ mm}$   $x_2 = 0 \text{ mm}$ ,  $y_2 = 0 \text{ mm}$  und für drei Tropfen bei  $x_1 = 0 \text{ mm}$ ,  $y_1 = 0 \text{ mm}$   $x_2 = 0 \text{ mm}$ ,  $y_2 = 0 \text{ mm}$   $x_3 = 0 \text{ mm}$ ,  $y_3 = 0 \text{ mm}$  für Material 2 dargestellt.

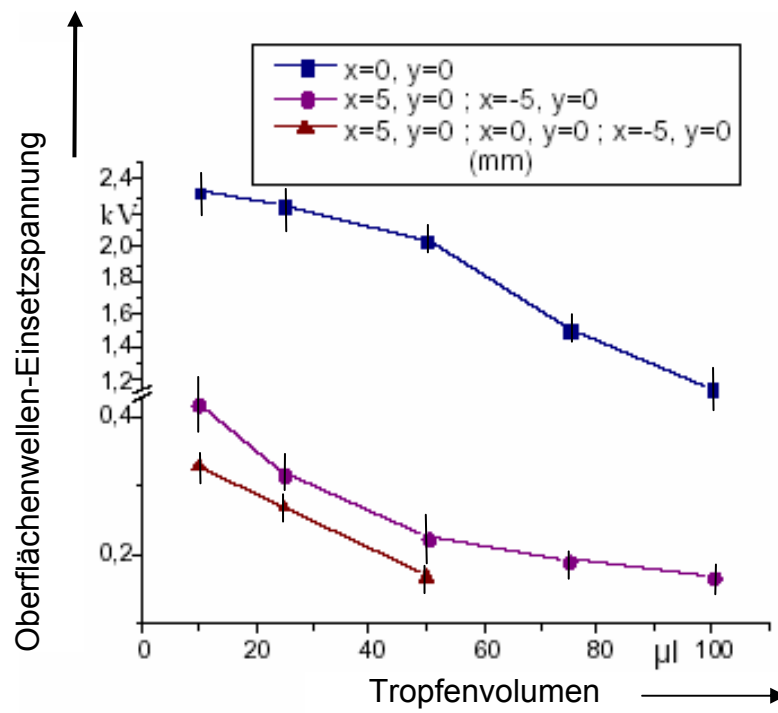


Bild 6.7: Oberflächenwellen-Einsetzspannung in Abhängigkeit der Tropfenanzahl für Material 2



## 6.6 Kategorien zur Beschreibung einer Tropfenbewegung

### 6.6.1 Geometrische Kenngrößen

Die zahlreichen Experimente zur Untersuchung von singulären Tropfen mit ausgewählten und variierten Parametern zeigen sehr unterschiedliche Verhaltensmuster der Tropfen. Im folgenden werden verschiedene Kategorien aufgestellt, um eine Systematisierung des Tropfenverhaltens zu ermöglichen.

Zur Beschreibung einer Momentaufnahme eines Tropfenzustandes wird der Tropfen in Profilansicht durch die drei geometrischen Parameter Radius  $r$ , Höhe  $h$  und Randwinkel  $\Theta$  charakterisiert. In Bild 6.8 sind diese drei Größen dargestellt, die sowohl in ihrem Betrag als auch zeitlich variieren können. Die Größen „Randwinkel“ und „Tripelpunkt“ werden für die rechte und linke Tropfenseite getrennt betrachtet, da sie sich unabhängig voneinander in ihrer Größe und in zeitlicher Abhängigkeit verändern können.

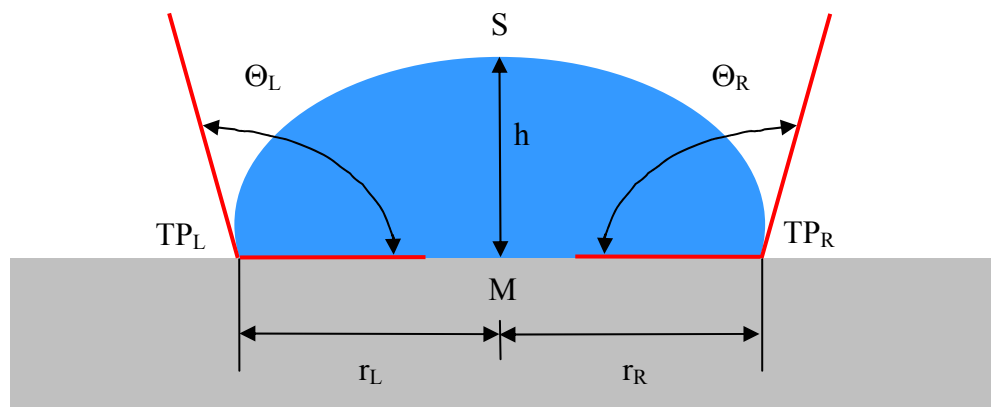


Bild 6.8: Definition der geometrischen Größen zur Beschreibung des Tropfenverhaltens

Im folgenden werden der Tropfendurchmesser und der Tropfenradius berücksichtigt, der an der Grenzfläche zwischen Feststoff und Flüssigkeit festgestellt werden kann. Bei der Bildung sehr großer Randwinkel auf sehr hydrophoben Materialien kann ein weiterer charakteristischer Durchmesser zur Beschreibung des Tropfens in Profilansicht herangezogen werden, der als „Äquatorialdurchmesser“ bezeichnet wird und in Bild 6.9 dargestellt ist. Dieser beschreibt die größte geometrische Ausdehnung im Tropfenprofil und befindet sich oberhalb des Tropfendurchmessers an der Grenzfläche.

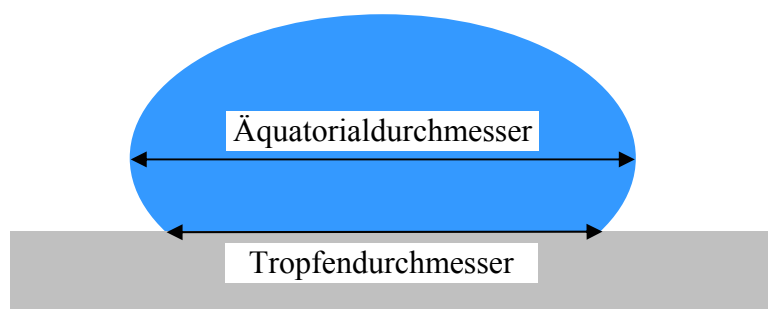


Bild 6.9: Definition des Äquatorialdurchmessers und des Tropfendurchmessers

Der Tropfendurchmesser an der Grenzfläche zur Feststoffoberfläche in Richtung der x-Koordinate des definierten Koordinatensystems auf der Isolierstoffoberfläche wird in einen linken  $r_L$  und einen rechten Radius  $r_R$  unterteilt. Dies ist notwendig, da bei einer unsymmetrischen Tropfenveränderung bezüglich der vertikalen Tropfenachse durch den Mittelpunkt M und den Scheitelpunkt S sich unterschiedliche Beträge der Kenngrößen ergeben. Nur bei einem nicht beanspruchten Tropfen haben die beiden Radien  $r_L$  und  $r_R$  vom Mittelpunkt M des Tropfens gemessen zu den jeweiligen Tripelpunkten am linken  $TP_L$  und am rechten  $TP_R$  Tropfenrand die gleichen Beträge. Bei einer Feldbeanspruchung werden sich die beiden Radien im allgemeinen voneinander unterscheiden. Nur bei einer zeitlich synchronen symmetrischen Richtungsänderung der Tripelpunkte mit gleichen Beträgen sind auch bei Feldbeanspruchung der linke und der rechte Radius gleich groß.

Durch eine Verschiebung der Tripelpunkte infolge einer Feldbeanspruchung verändern sich die beiden Randwinkel  $\Theta_L$  und  $\Theta_R$  am linken und rechten Tripelpunkt. Die Höhe  $h$ , die maximale Abmessung des Tropfens in

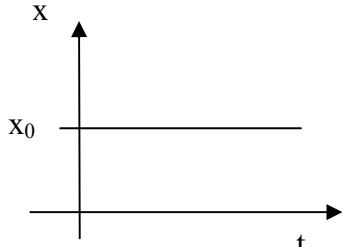
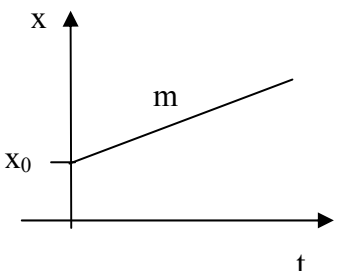
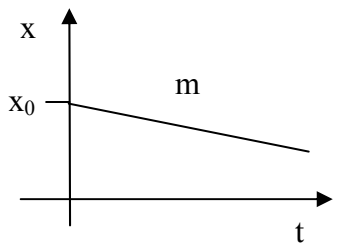
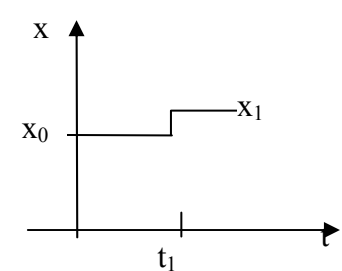
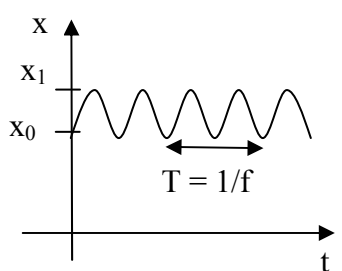
z-Koordinatenrichtung auf der vertikalen Achse zwischen dem Tropfenmittelpunkt M und dem Tropfenscheitelpunkt S, beschreibt die Lage des Scheitelpunktes S über dem Mittelpunkt M des Tropfens. Bei unbeanspruchtem Tropfen ist der Scheitelpunkt S der höchste Punkt im Tropfenprofil. Die Höhe des Tropfens kann sich periodisch ändern oder eine einmalige Änderung zeigen. Bei Wechsellspannung ist eine periodische Änderung der Höhe typisch, während bei Gleichspannung eine einmalige Höhenreduzierung beim Einschalten der Hochspannung beobachtet wird unter der Voraussetzung einer sonst stabilen Tropfenform.

Die numerische Indexbezeichnung ermöglicht eine zeitliche Unterscheidung verschiedener Momentaufnahmen der Tropfenbewegungen. Der Index „0“ wird für die Beschreibung des Tropfens vor der Feldbeanspruchung verwendet. Die folgenden um jeweils eine ganze Zahl erhöhten Indices beschreiben die Tropfengeometrie zu bestimmten Zeitpunkten während der Spannungsbeanspruchung. Die Kombination der Indices mit den drei Kenngrößen ermöglicht eine systematische Beschreibung der veränderlichen Größen in einer Bildsequenz. Im Folgenden werden für die drei geometrischen Kenngrößen Tripelpunkt, Randwinkel und Tropfenhöhe verschiedene Kategorien zur mathematischen Beschreibung des Tropfenverhaltens dargestellt. Für die Beschreibung der Tripelpunkte und der Randwinkel sind die vorgeschlagenen Kategorien jeweils für den rechten und den linken Tropfenrand getrennt zuzuordnen.

### 6.6.2 Tripelpunkt

Zur Beschreibung des Verhaltens der Tripelpunkte werden in Tabelle 6.6 verschiedene Kategorien vorgeschlagen, die eine Tripelpunktwanderung in Abhängigkeit der Zeit berücksichtigen. Jede dieser Kategorien ist für jeweils den rechten und linken Tripelpunkt getrennt zu betrachten. Die Lage des Tripelpunktes kann unverändert während der Spannungsbeanspruchung bleiben oder sich zeitabhängig entweder einmalig oder mehrfach in einer kontinuierlichen oder sprunghaftigen Bewegung ändern. Die Bewegung des Tripelpunktes wird durch die Veränderung der x-Koordinate des definierten Koordinatensystems auf der Isolierstoffoberfläche beschrieben.

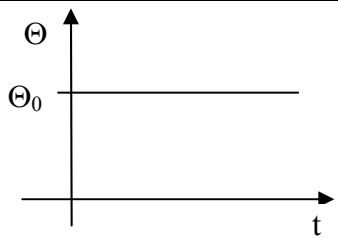
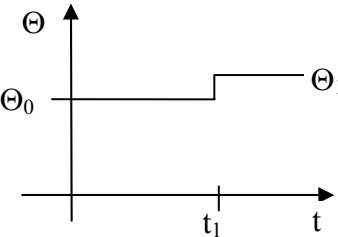
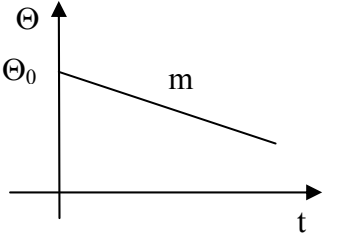
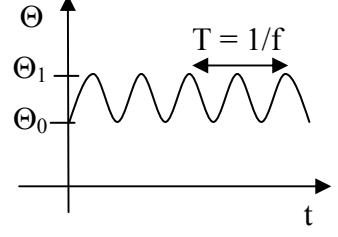
Tabelle 6.6: Kategorien zur Beschreibung des Verhaltens eines Tripelpunktes

Nr.	Zeitfunktion	Beschreibung
A		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Tripelpunkt ist ortsfest.</li> <li>• Parameter: <math>x_0</math>: Ort des Tripelpunktes</li> </ul>
B		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Tripelpunkt verschiebt sich kontinuierlich vom Tropfenrand weg. Der Durchmesser des Tropfens vergrößert sich.</li> <li>• Parameter: <math>x_0</math>: Ort des Tripelpunktes zu Beginn <math>m</math>: Steigung der Geraden</li> </ul>
C		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Tripelpunkt verschiebt sich kontinuierlich in Richtung Tropfenmittelpunkt. Der Durchmesser des Tropfens verkleinert sich.</li> <li>• Parameter: <math>x_0</math>: Ort des Tripelpunktes zu Beginn <math>m</math>: Steigung der Geraden</li> </ul>
D		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Tripelpunkt bewegt sich ruckartig vom Tropfenrand weg. Der Durchmesser des Tropfens vergrößert sich.</li> <li>• Parameter: <math>x_0</math>: Ort des Tripelpunktes zu Beginn <math>x_1</math>: Ort des Tripelpunktes nach der Bewegung</li> </ul>
E		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Tripelpunkt oszilliert vom Tropfenrand weg und wieder in Richtung Tropfenmitte zurück.</li> <li>• Parameter: <math>x_0</math>: Ort des Tripelpunktes zu Beginn <math>x_1</math>: Ort des Tripelpunktes bei maximaler Auslenkung <math>T</math>: Periodendauer der Bewegung <math>f</math>: Frequenz der Oszillation des Tripelpunktes</li> </ul>

### 6.6.3 Randwinkel

Der Randwinkel am rechten und linken Tripelpunkt kann sich in seinem Betrag und in Abhängigkeit der Zeit ändern. Bei einer unsymmetrischen Tropfenverformung sind die beiden sich ändernden Randwinkel unterschiedlich groß. Aus diesem Grund sind für die Beschreibung des Randwinkels die in Tabelle 6.7 vorgeschlagenen Kategorien getrennt für die beiden Tropfenränder anzuwenden.

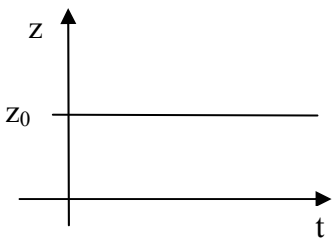
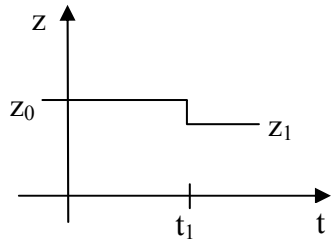
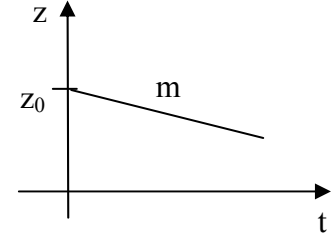
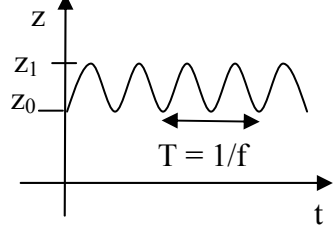
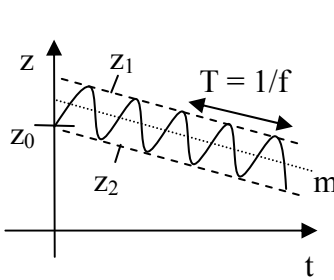
Tabelle 6.7: Kategorien zur Beschreibung des Verhaltens eines Randwinkels

Nr.	Zeitfunktion	Beschreibung
Q		<ul style="list-style-type: none"> <li>Der Randwinkel bleibt konstant.</li> <li>Parameter <math>\Theta_0</math>: Wert des Randwinkels</li> </ul>
R		<ul style="list-style-type: none"> <li>Der Randwinkel ändert sich sprunghaft.</li> <li>Parameter <math>\Theta_0</math>: Randwinkel zu Beginn <math>\Theta_1</math>: Randwinkel nach der Änderung</li> </ul>
S		<ul style="list-style-type: none"> <li>Der Randwinkel ändert sich kontinuierlich,</li> <li>Parameter <math>\Theta_0</math>: Randwinkel zu Beginn m: Steigung der Geraden</li> </ul>
T		<ul style="list-style-type: none"> <li>Der Randwinkel ändert sich periodisch.</li> <li>Parameter <math>\Theta_0</math>: minimaler Randwinkel <math>\Theta_1</math>: maximaler Randwinkel T: Periodendauer der Bewegung f: Frequenz der Randwinkeländerung</li> </ul>

### 6.6.4 Tropfenhöhe

Die Tropfenhöhe in vertikaler Richtung über dem Mittelpunkt M des Tropfens ändert sich infolge der Oberflächenstrukturen des Tropfens in Abhängigkeit der Zeit. In Tabelle 6.8 sind mögliche Kategorien zur Beschreibung dieser Veränderung gegeben.

Tabelle 6.8: Kategorien zur Beschreibung der Tropfenhöhe

Nr.	Zeitfunktion	Beschreibung
1	 <p>A coordinate system with vertical axis <math>z</math> and horizontal axis <math>t</math>. A horizontal line is drawn at height <math>z_0</math> on the <math>z</math>-axis.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Höhe ist konstant.</li> <li>Parameter: <math>z_0</math>: Höhe</li> </ul>
2	 <p>A coordinate system with vertical axis <math>z</math> and horizontal axis <math>t</math>. The graph shows a horizontal line at <math>z_0</math> until time <math>t_1</math>, where it drops abruptly to a lower constant value <math>z_1</math>.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Höhe verringert sich sprunghaft.</li> <li>Parameter: <math>z_0</math>: Höhe zu Beginn <math>z_1</math>: Höhe nach der Veränderung</li> </ul>
3	 <p>A coordinate system with vertical axis <math>z</math> and horizontal axis <math>t</math>. A straight line starts at <math>z_0</math> on the <math>z</math>-axis and slopes downwards. The slope is labeled <math>m</math>.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Höhe nimmt kontinuierlich ab.</li> <li>Parameter: <math>z_0</math>: Höhe zu Beginn <math>m</math>: Steigung der fallenden Geraden</li> </ul>
4	 <p>A coordinate system with vertical axis <math>z</math> and horizontal axis <math>t</math>. The graph shows a periodic wave oscillating between a minimum height <math>z_0</math> and a maximum height <math>z_1</math>. The period of the oscillation is indicated as <math>T = 1/f</math>.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Höhe schwankt periodisch.</li> <li>Parameter: <math>z_0</math>: minimale Höhe <math>z_1</math>: maximale Höhe <math>f</math>: Frequenz der Bewegung</li> </ul>
5	 <p>A coordinate system with vertical axis <math>z</math> and horizontal axis <math>t</math>. The graph shows a damped oscillation. The amplitude envelope is a dashed line starting at <math>z_0</math> and decreasing linearly with slope <math>m</math>. The oscillation peaks at <math>z_1</math> and troughs at <math>z_2</math>. The period of the oscillation is indicated as <math>T = 1/f</math>.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Höhe schwankt periodisch, nimmt aber gleichzeitig kontinuierlich ab.</li> <li>Parameter: <math>z_0</math>: Höhe zu Beginn <math>z_1</math>: maximale Höhe der Oszillation <math>z_2</math>: minimale Höhe der Oszillation <math>m</math>: Steigung der fallenden Geraden <math>T</math>: Periodendauer der Bewegung <math>f</math>: Frequenz der Bewegung</li> </ul>

### 6.6.5 Definition des Tropfenverhaltens

Zur Beschreibung des Verhaltens eines singulären Tropfens werden die zuvor definierten Kategorien zur Beschreibung des Tripelpunktes, der Tropfenhöhe und des Randwinkels miteinander kombiniert. Es ergeben sich dann verschiedene Verhaltenstypen, die sobald sich eine Veränderung einer der Kenngrößen einstellt, in einer zeitlichen Abfolge aneinandergereiht werden können. Befinden sich mehrere Tropfen auf der Isolierstoffoberfläche, sind für jeden einzelnen Tropfen die Verhaltenstypen aufzustellen.

Für eine Zeitspanne bis zur Veränderung einer Kenngröße wird das Verhalten eines Tropfens mit den in Tabelle 6.9 möglichen Kategorien beschrieben. Die Reihenfolge der Codierung soll wie folgt vorgenommen werden:

linker Tripelpunkt  $r_L$  – linker Randwinkel  $\Theta_L$  – Tropfenhöhe  $h$   
 – rechter Randwinkel  $\Theta_R$  – rechter Tripelpunkt  $r_R$

Die Codierung des Tropfenverhaltens in der oben genannten Reihenfolge erlaubt eine sofortige Erkennung einer symmetrischen oder unsymmetrischen Tropfenveränderung. Bei einer symmetrischen Verformung des Tropfens ist auch die Tropfenbeschreibung bezüglich der mittleren Zahl der Tropfenhöhe symmetrisch. Beispiele für symmetrisches Tropfenverhalten sind AR1RA, BS4SB oder CT3TC, Beispiele für unsymmetrisches Tropfenverhalten sind AR1SA, AT5SB oder BS3TC. Für die präzise Analyse des Tropfenverhaltens werden zusätzlich die zuvor definierten Parameter, wie die Steigung der Geraden  $m$ , die maximale und minimale Höhe und der maximale und minimale Randwinkel benötigt. Nur bei identischen Parametern in den vier Verhaltenskategorien linker und rechter Randwinkel und linker und rechter Radius liegt ein exakt symmetrisches Verhalten vor.

Tabelle 6.9: Kategorien zur Definition des Tropfenverhaltens

Kenngröße	mögliche Kategorie
linker Tripelpunkt $r_L$	A, B, C, D, E
linker Randwinkel $\Theta_L$	Q, R, S, T
Tropfenhöhe $h$	1, 2, 3, 4, 5
rechter Randwinkel $\Theta_R$	Q, R, S, T
rechter Tripelpunkt $r_R$	A, B, C, D, E

### 6.6.6 Beispiele für typische Tropfenverhalten

In Tabelle 6.10 werden einige Beispiele für die Kategorisierung des Tropfenverhaltens angegeben. Dabei wird von typischen, aber sehr einfachen Verhaltensformen ausgegangen. Diese werden komplexer, sobald mehrere Tropfen betrachtet werden, da für jeden Tropfen eine Beschreibung notwendig ist und sich die Tropfenformen gegenseitig beeinflussen.

Tabelle 6.10: Beschreibung des Tropfenverhaltens anhand von Beispielen

Vorgang	Beschreibung	Verhaltenstyp
Verdunstungsvorgang ohne Feldbeanspruchung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• symmetrisches Verhalten: Tripelpunkte ortsfest, Randwinkel verringern sich kontinuierlich, Höhe verringert sich kontinuierlich</li> <li>• Durchmesser nimmt ab, Randwinkel verringern sich, Höhe verringert sich kontinuierlich</li> <li>• Beispiel: Bildsequenz 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>0 &lt; t \leq t_1</math>: AS3SA</li> <li>• <math>t_1 &lt; t \leq t_2</math>: CS3SC</li> </ul>
Verdunstungsvorgang mit Feldbeanspruchung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• symmetrisches Verhalten: Tripelpunkte ortsfest, Randwinkel verringern sich kontinuierlich, Höhe oszilliert und verringert sich gleichzeitig</li> <li>• Tripelpunkte verschieben sich, Randwinkel verringern sich, Höhe oszilliert und verringert sich gleichzeitig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>0 &lt; t \leq t_1</math>: AS5SA</li> <li>• <math>t_1 &lt; t \leq t_2</math>: CS5SC</li> </ul>
Bildung eines Sprühtropfens	<ul style="list-style-type: none"> <li>• symmetrisches Verhalten: singulärer Tropfen im Wechselfeld</li> <li>• Bildung eines Sprühtropfens</li> <li>• singulärer Tropfen im Wechselfeld</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>0 &lt; t \leq t_1</math>: AT4TA</li> <li>• <math>t = t_2</math>: AT2TA</li> <li>• <math>t_2 &lt; t \leq t_3</math>: AT4TA</li> </ul>
Bildung einer Flüssigkeitsspur am linken Tripelpunkt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• symmetrisches Verhalten: singulärer Tropfen im Wechselfeld</li> <li>• unsymmetrisches Verhalten: Verschiebung des linken Tripelpunktes, rechter Tripelpunkt bleibt ortsfest</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>0 &lt; t \leq t_1</math>: AT4TA</li> <li>• <math>t_1 &lt; t \leq t_2</math>: BS3TA</li> </ul>



Die hier gegebenen Beispiele sind qualitativ, da bisher eine automatisierte Auswertung der einzelnen Bildsequenzen fehlt. Eine solche Auswertung wird zukünftig notwendig sein, da bei den Experimenten große Datenmengen erzeugt werden, die nicht von Hand auszuwerten sind. Bei einer einzigen Aufnahme eines digitalen Videofilms von zwei Sekunden Dauer mit dem Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem können bis zu 4000 Einzelbilder entstehen. Da sich die geometrischen Kenngrößen „Randwinkel“, „Tropfenhöhe“ und „Lage der Tripelpunkte“ im elektrischen Wechselfeld ständig ändern, ist es sinnvoll dies auch auszuwerten. Falls nicht alle Bilddaten eines Videofilms ausgewertet werden sollen, so muß darauf geachtet werden, daß zeitlich äquidistante Augenblickswerte miteinander verglichen werden. Nur dann kann eine Aussage über das Tropfenverhalten getroffen werden. Wird diese Regel nicht eingehalten, kann es vorkommen, daß z.B. periodische Änderungen nicht wahrgenommen werden. Die zu entwickelnde Auswertesoftware muß zunächst die Feststoffoberfläche genau erkennen. Wird diese um nur wenige Millimeter falsch angenommen, so kommt es zu sehr großen Fehlern bei der Auswertung der Randwinkel. Eine geeignete Beleuchtung und Erfahrung mit der optischen Diagnosetechnik kann dabei eine sehr große Hilfe sein, um geeignete Aufnahmen für automatisierte Auswertesysteme bereitzustellen.

Mit der Auswertesoftware soll ebenfalls eine beliebige zweidimensionale Kontur des Tropfens erkannt werden. Hierzu sind Algorithmen notwendig, die bestmöglichst die teilweise unsymmetrischen Konturen des Tropfens oder mehrerer Tropfen erfassen. Aus der Randkurve der Tropfenkontur sollten aus dem ersten Bild des Videofilms die Anfangsparameter, d.h. der Ort der Tropfenmitte und der Ort der beiden Tripelpunkte eines Tropfens, festgehalten werden. Die Tropfenmitte, als Punkt M bezeichnet, wird dann in den nachfolgenden Bildaufnahmen unverändert beibehalten. An diesem Punkt wird die Tropfenhöhe in Abhängigkeit der Zeit ausgewertet.

Es ist auch vorstellbar, daß die Software aus zwei zueinander orthogonal aufgenommenen zeitgleichen Bildern von einem Tropfen aus der Sicht von oben auf den Tropfen und in Profilansicht ein dreidimensionales Bild erzeugt. So könnten dann beliebige Schnittebenen der Tropfengeometrie ausgewertet werden. Dies wird

dann besonders interessant, wenn mehrere Tropfen auf der Isolierstoffoberfläche im elektrischen Feld zusammenfließen.

Die Auswertesoftware sollte nach der Abarbeitung eines Videofilms, d.h. nach dem Einlesen und der Auswertung aller Einzelbilder die zeitabhängigen Größen jeweils, wie in den Tabellen 6.6 bis 6.8 vorgestellt, darstellen und daraus Verhaltensmuster ableiten. Die Ergebnisse der Experimente können danach in einer Datenbank gespeichert werden, um für weitere Auswertungen und bei der Suche nach ähnlichen Verhaltensformen zur Verfügung zu stehen. Das Ergebnis der automatischen Auswertung sollte eine wie in diesem Kapitel vorgeschlagene zeitabhängige Kategorisierung der geometrischen Kenngrößen der Tropfen sein, die in der Datenbank bei gleichzeitiger Hinterlegung des Originalfilms jederzeit abrufbereit sein sollen.

## 7 Simulationsrechnungen an singulären Tropfen

### 7.1 Ziele der Simulationsrechnungen

Zur Klärung der Wechselwirkungen zwischen der Veränderung des elektrischen Führungsfeldes durch die Anwesenheit von Tropfen auf einer Isolierstoffoberfläche und der Feldveränderung aufgrund von Tropfendeformationen bei Spannungsbeanspruchung werden Feld- und Kräfteberechnungen durchgeführt. Ziel dieser Berechnungen ist es, eine Modellierung der Vorgänge an elektrisch beanspruchten singulären Tropfen auf Isolierstoffoberflächen zu ermöglichen. Die experimentellen Untersuchungen liefern hierfür elektrische Kenngrößen und Tropfengeometrien, die als Parameter für die Berechnungen verwendet werden. Mit den Ergebnissen der Simulationsrechnungen sollen Erklärungen für das Verhalten der Tropfen im elektrischen Feld gefunden werden.

### 7.2 Simulationsprogramm

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationsrechnungen wird das Softwarepaket MAFIA Version 4.0 der Gesellschaft für Computer-Simulationstechnik (CST) eingesetzt. Das Programm MAFIA (MAxellsche Gleichungen mit dem Finiten Integrations Algorithmus) löst das gesamte System der Maxwell'schen Gleichungen numerisch mit der Finite-Integrations-Technik (FIT) [73], [77], [115]. Diese Methode wurde mit dem Ziel entwickelt, das gesamte System dieser Gleichungen mit einer eindeutigen Umsetzung in möglichst weitreichender Allgemeinheit numerisch zu lösen. Die FIT-Methode stellt somit ein theoretisches Fundament zur Lösung der Maxwell'schen Gleichungen in Integralform dar.

Mit dem Programm MAFIA können zwei- und dreidimensionale Computersimulationen elektromagnetischer Felder für unterschiedliche Frequenzbereiche durchgeführt werden.

Die Simulation geht von den allgemeinen Maxwellschen Gleichungen aus:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (7.1)$$

$$\text{rot } \vec{H} = \left( \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) + \vec{J} \quad (7.2)$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (7.3)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (7.4)$$

Das hier verwendete Modul des Programms MAFIA zur Berechnung eines niederfrequenten elektrischen Feldes beruht auf den Maxwellschen Gleichungen der Quasistatik. Die quasistatischen Gesetze für langsam veränderliche Felder, wie sie bei den mit einer Frequenz von  $f = 50 \text{ Hz}$  oder  $f = 60 \text{ Hz}$  betriebenen Hochspannungsanlagen vorliegen, ergeben sich aus den Maxwellschen Gleichungen durch Vernachlässigung der magnetischen Induktion für die Elektro-Quasistatik oder des elektrischen Verschiebungsstromes für die Magneto-Quasistatik.

Die hier durchgeführten Berechnungen beruhen auf der Elektro-Quasistatik, die folgende Bedingungen voraussetzt.

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (7.5)$$

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \neq 0 \quad (7.6)$$

Das elektromagnetische Feld der hier betrachteten Thematik ist langsam veränderlich. Die zeitliche Änderung der magnetischen Flußdichte ist vernachlässigbar. Im Gegensatz zu quasistationären Feldern kann hier jedoch der Verschiebungsstrom nicht vernachlässigt werden. Dieser ist wesentlich bei der Betrachtung feuchter Isolierstoffoberflächen.

Bei harmonischer Zeitabhängigkeit und mit der Darstellung der komplexen Feldgrößen ergeben sich unter Berücksichtigung der Bedingungen (7.5) und (7.6) folgende Maxwellsche Gleichungen:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0 \quad (7.7)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = j\omega \vec{D} + \kappa \vec{E} + \vec{J}_E \quad (7.8)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (7.9)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (7.10)$$

Mit der Einführung eines komplexen skalaren Potentials  $\varphi$

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi \quad (7.11)$$

kann die folgende komplexe Poisson-Gleichung im Fall homogener isotroper Medien hergeleitet werden. Für das komplexe skalare Potential  $\varphi$  gilt demnach:

$$\Delta \varphi = \frac{1}{j\omega \varepsilon + \kappa} \operatorname{div} \vec{J}_E \quad (7.12)$$

In dieser grundlegenden Gleichung wird sowohl die Dielektrizitätszahl  $\varepsilon$  als auch die Leitfähigkeit  $\kappa$  berücksichtigt. Diese beiden Größen werden in die folgenden vorgestellten elektro-quasistatischen Simulationsrechnungen einbezogen.

Die Simulationsrechnungen an singulären Tropfen im elektrischen Feld werden am Institut für Allgemeine Elektrotechnik an der Universität Rostock bei Frau Prof. Dr. rer. nat. habil. van Rienen im Rahmen einer Aufgabenteilung durchgeführt. Hierbei können die Ergebnisse der experimentellen Arbeiten am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt als Eingabeparameter für die Simulation verwendet werden [116], [117], [118], [119].

Ein weiteres Ziel der Simulationsrechnungen ist eine Modellierung von singulären Tropfen auf realen Isolatoren mit geometrisch gekrümmten Isolierstoffoberflächen, z.B. in Form von Isolatorschirmen. In Bild 7.1 [78] ist ein zylindrischer Modellprüfkörper mit einer einfach gekrümmten Oberfläche dargestellt, auf dem unregelmäßig aufgetragene singuläre Tropfen simuliert werden können. Dies ist ein nächster Schritt der Simulationen, bevor noch komplexere Geometrien untersucht werden. Somit wird statt der in dieser Arbeit verwendete quaderförmige Epoxidharz-Prüfkörper ein realitätsnäherer zylinderförmiger Isolator berechnet. Das Modell in Bild 7.1 ist ein 30 mm langer zylindrischer Körper mit einem Radius von 15 mm. Für alle hier vorgestellten Berechnungen werden für Epoxidharz-Formstoff

$\epsilon_{\text{rFeststoff}} = 4$  und  $\kappa_{\text{Feststoff}} = 10^{-12} \text{ S/m}$  angenommen. Die Tropfen werden mit  $\epsilon_{\text{rWasser}} = 81$  und  $\kappa_{\text{Wasser}} = 10^{-6} \text{ S/m}$  nachgebildet. Als umgebendes Gas wird atmosphärische Luft angenommen mit einer Dielektrizitätszahl von  $\epsilon_{\text{rLuft}} = 1,000576$ . Die in Bild 7.1 simulierten Tropfen haben jeweils einen Durchmesser von 3 mm.

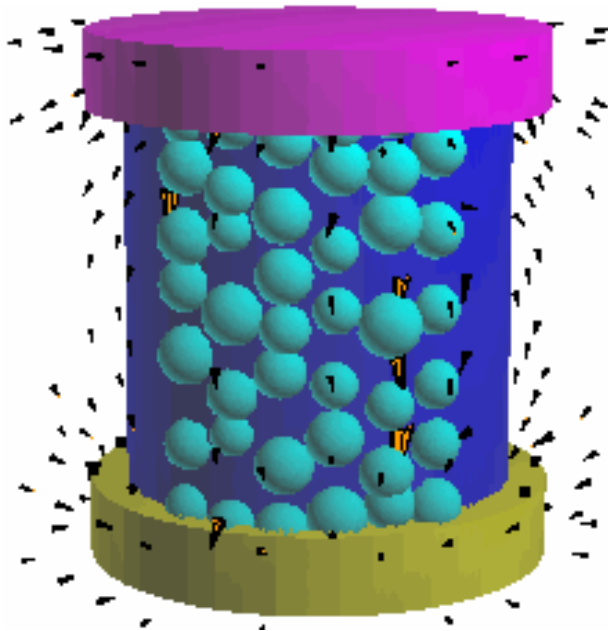


Bild 7.1: Zylindrischer Modellprüfkörper mit singulären Tropfen [78]  
– Freundlicherweise zur Verfügung gestellt von  
Frau Prof. Dr. rer. nat. habil. Ursula van Rienen –

### 7.3 Feld- und Kräfteberechnungen

Zum Verständnis der Wechselwirkungen zwischen dem äußeren Führungsfeld und dem durch die Anwesenheit der Tropfen veränderten Gesamtfeld ist zunächst die Kenntnis des unbeeinflussten Führungsfeldes notwendig. Dieses ist von der Geometrie des Prüfkörpers und der anliegenden Hochspannung abhängig. In einem Optimierungsprozeß wurde die Prüfkörpergeometrie anhand von Simulationsrechnungen so gewählt, daß ein möglichst homogenes Führungsfeld in dem zu untersuchenden Gebiet auf dem Prüfkörper entsteht. Für die gewählte Geometrie des Prüfkörpers, in Bild 6.1 dargestellt, wird in Bild 7.2 [116] die Komponente des Führungsfeldes in x-Richtung entlang der Isolierstoffoberfläche unter Berücksichtigung folgender Parameter gezeigt:

$$\hat{u} = 13 \text{ kV}, f = 50 \text{ Hz}, \epsilon_{r\text{Luft}} = 1, \epsilon_{r\text{Feststoff}} = 4, \kappa_{\text{Feststoff}} = 10^{-12} \text{ S/m}$$

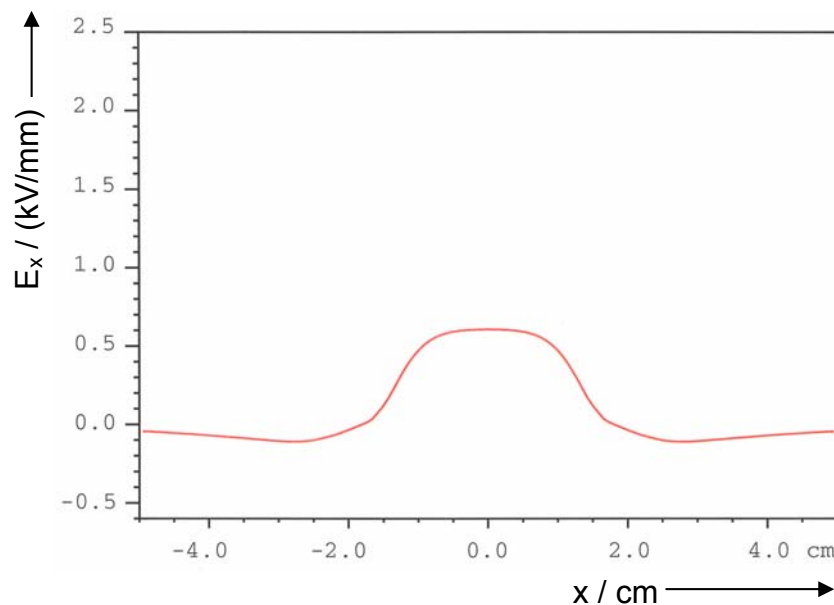


Bild 7.2: Elektrisches Fremdfeld ohne Tropfen –  
 $E_x$ -Komponente auf der Prüfkörperoberfläche [116]  
 – Freundlicherweise zur Verfügung gestellt von  
 Frau Prof. Dr. rer. nat. habil. Ursula van Rienen –

Die am quaderförmigen Modellprüfkörper anliegende Hochspannung erzeugt ein äußeres Fremdfeld, das in der Mitte der Prüfkörperoberfläche nahezu homogen ist. Die in Bild 7.2 gezeigte Komponente des Feldes entlang der x-Koordinatenachse auf der Prüfkörperoberfläche dominiert den Feldverlauf. Die y-Komponente und z-Komponente des Fremdfeldes sind vernachlässigbar gering.

Durch die Anwesenheit von singulären Tropfen auf der Isolieroberfläche zwischen den eingebetteten Elektroden des Modellprüfkörpers ändert sich das Gesamtfeld der Anordnung. Das zuvor vorhandene Fremdfeld wird verändert. An den Tripelpunkten der Tropfen bilden sich hohe Feldstärken aus. In Bild 7.3 [116] wird für folgende Parameter die x-Komponente des resultierenden elektrischen Feldes entlang der Isolierstoffoberfläche dargestellt.

$$\hat{u} = 13 \text{ kV}, f = 50 \text{ Hz},$$

$$\epsilon_{\text{rLuft}} = 1, \epsilon_{\text{rWasser}} = 81, \kappa_{\text{Wasser}} = 10^{-6} \text{ S/m}, \epsilon_{\text{rFeststoff}} = 4, \kappa_{\text{Feststoff}} = 10^{-12} \text{ S/m},$$

$$d_{1\text{Tropfen}} = 5 \text{ mm}, d_{2\text{Tropfen}} = 5 \text{ mm},$$

$$\text{Tropfenmittelpunkte bei } x = -7,5 \text{ mm}, y = 0 \text{ mm und } x = +7,5 \text{ mm}, y = 0 \text{ mm}$$

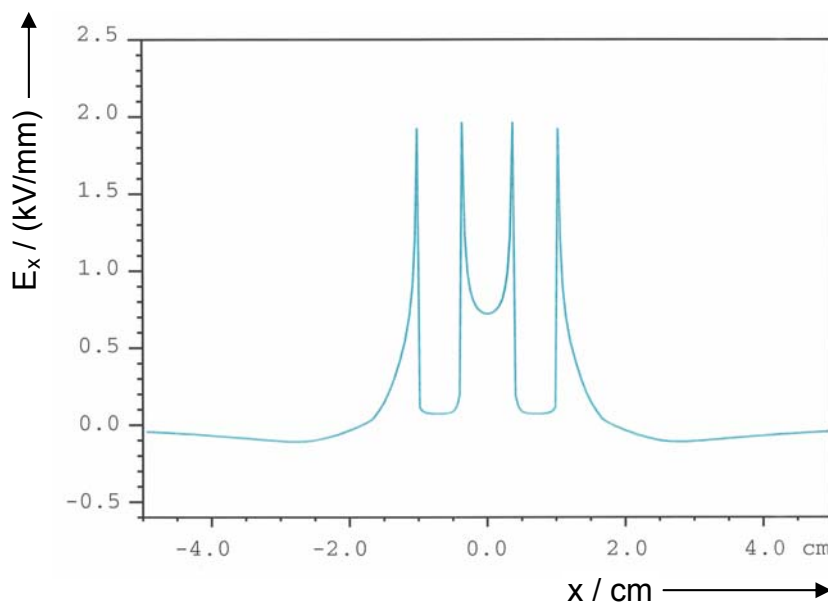


Bild 7.3: Zwei singuläre Tropfen verändern das äußere Fremdfeld –  $E_x$ -Komponente auf der Prüfkörperoberfläche [116]

– Freundlicherweise zur Verfügung gestellt von  
Frau Prof. Dr. rer. nat. habil. Ursula van Rienen –



Kräfteberechnungen, ebenfalls mit dem Programm MAFIA durchgeführt, zeigen auf der Tropfenoberfläche unterschiedlich große Kraftwirkungen. Die höchsten Kräfte treten an den Tripelpunkten in Richtung der x-Koordinate des definierten Koordinatensystems auf dem Modellprüfkörper auf. Die Bereiche der vom Tripelpunkt entfernten Oberflächen scheinen weniger Krafteinwirkungen zu erfahren. Die berechneten Kräfte können für die beobachteten Deformierungen der Tropfen und die Wanderungen der Tripelpunkte im elektrischen Feld auf dem Modellprüfkörper in Richtung der positiven und negativen x-Koordinate verantwortlich sein. Die Beträge der Kräfte sind von der Position des Tropfens auf der Isolierstoffoberfläche abhängig und können bei  $\hat{u} = 13 \text{ kV}$  bis über  $45 \text{ N/m}^2$  als Gesamtkraft und über  $35 \text{ N/m}^2$  als Kraft in Richtung der x-Komponente betragen [118], [119].

## **8 Erkenntnisse aus den durchgeführten Untersuchungen**

### **8.1 Tropfen im elektrischen Feld auf Isolierstoffoberflächen**

Die geometrische Form eines Wassertropfens auf einer horizontalen Isolierstoffoberfläche im feldfreien Zustand wird durch die Materialeigenschaften des Feststoffes und die Kenngrößen der Flüssigkeit bestimmt. Die Oberfläche des sich ausbildenden Tropfens ist bestrebt, bedingt durch die Oberflächenspannung, einen möglichst kleinen Wert anzunehmen und somit eine Minimalfläche zu bilden. Für hydrophobe Oberflächen ergibt sich eine kugelähnliche Form des Tropfens, während sich bei weniger hydrophoben Oberflächen eine flachere ellipsenähnliche Form des Tropfens bei gleichen Flüssigkeitseigenschaften einstellt.

Ein singulärer Wassertropfen auf einer Isolierstoffoberfläche kann physikalisch als ein mechanisches schwingungsfähiges System betrachtet werden. Das elektrische Wechselfeld wirkt als äußere Anregung auf den Wassertropfen, der infolge von Feldkräften periodisch erzwungene Schwingungen ausführt. Der Tropfen führt ab einer kritischen Feldstärke Bewegungen um seine Gleichgewichtslage aus und zeigt dabei charakteristische Oszillationsmuster, wie diese auch in ähnlicher Form bei mechanisch angeregten Flüssigkeiten [120] oder bei periodisch angeregten Ferrofluiden durch ein äußeres starkes Magnetfeld vorliegen [121], [122]. Die in den experimentellen Untersuchungen analysierten Oberflächenstrukturen sind von der Höhe der anliegenden Wechselspannung, deren Frequenz und dem Tropfenvolumen abhängig. Die Materialeigenschaften und Flüssigkeitseigenschaften wirken sich auf die Tropfenform und die Bogenlänge des Tropfenprofils aus und sind für Resonanzbedingungen ebenfalls entscheidend. Die Oberflächenstrukturen wiederholen sich innerhalb und in aufeinanderfolgenden Spannungsperioden und können den Augenblickswerten der anliegenden Spannung zugeordnet werden. Bei einer elektrischen Beanspruchung mit einer Frequenz von 50 Hz können die Tropfen dem theoretischen Wert der doppelten Frequenz [56] folgen. Für höhere Frequenzen

stellen sich höherfrequente Strukturen mit geringeren Amplituden ein, die kaum von der Oberfläche eines unbeanspruchten Tropfens zu unterscheiden sind.

Im Gegensatz zur Ausbildung von Oberflächenstrukturen im Wechselfeld verhält sich ein Tropfen im Gleichfeld bei gleicher Spannungshöhe formstabil. Dies läßt die Folgerung zu, daß die Oszillationsbewegungen durch die Wirkung des Wechselfeldes verursacht werden.

Bei der Anwesenheit eines elektrischen Feldes wirken auf einen Tropfen elektrische Kräfte, die besonders stark an den Tripelpunkten in Feldrichtung angreifen. Dies kann sowohl anhand der Beobachtungen im Experiment wie auch durch Feld- und Kräfteberechnungen in dieser Arbeit bestätigt werden. Die Kräfte bewirken eine Ausdehnung des Tropfens in Richtung des Feldlinienverlaufs. Die an dem Tropfen wirkenden elektrischen Kräfte, die eine ellipsenförmige Ausdehnung der Tropfenform bewirken, müssen den Rückstellkräften der Viskosität als innere Reibung des Tropfens und der Reibung an der Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Feststoff entgegenwirken.

Die in [45] beobachtete Randwinkelhysterese an singulären Tropfen im hohen elektrischen Gleichfeld bei einer Spannungssteigerung kann bestätigt und für das Tropfenverhalten bei einer Wechselspannung mit konstanter Amplitude erweitert werden. Bei Gleich- und Wechselspannung bewegen sich die Tripelpunkte aufgrund einer Ausdehnung des Tropfens in Feldrichtung. Dies geschieht bei Gleichspannung sehr ruckartig, während bei Wechselspannung dieser Vorgang kontinuierlich verläuft. Die Verformungen am Tropfen bei Gleich- und Wechselspannung bewirken eine Änderung der Randwinkel, wie in Bild 2.4 schematisch dargestellt. Diese sind aber in den wenigsten Fällen symmetrisch bezüglich der Tropfenmitte. Bei Wechselspannung werden dieser Hystereseerscheinung periodische Randwinkeländerungen in dem Bereich zwischen Vorrück- und Rückzugswinkel innerhalb einer Spannungsperiode überlagert.

Die Aussagen in [47] zu Resonanzerscheinungen an singulären Tropfen im elektrischen Wechselfeld können erweitert werden. In den hier durchgeführten Untersuchungen werden ebenfalls verschiedenen Resonanzerscheinungen bei unterschiedlichen Frequenzen an Tropfen gleichen Volumens beobachtet. Diese Resonanzerscheinungen in Form sich wiederholender transienter

Oberflächenstrukturen sind allerdings zusätzlich von der Spannungshöhe abhängig. Hierzu wird in dieser Arbeit eine Oberflächenwellen-Einsetzspannung definiert, bei der erstmalig solche Resonanzerscheinungen feststellbar sind. Die Untersuchungen an zwei und drei benachbarten singulären Tropfen zeigen eine gegenseitige Beeinflussung der Tropfen, die sich auf die Tropfenform und somit auf eine Änderung der Oberflächenwellen auswirkt. Aus diesem Grund haben die Aussagen zu Resonanzerscheinungen nur eine Gültigkeit bei singulären Tropfen, die nicht durch benachbarte Tropfen beeinflusst werden und deren Tripelpunkte zum Zeitpunkt der Feststellung einer Resonanzerscheinung ortsfest sind. Bei einer Verschiebung der Tripelpunkte verändert sich die Bogenlänge des Tropfens und somit die Bedingung für Resonanzerscheinungen.

Bei nahe zueinander platzierten singulären Tropfen auf einer horizontalen Isolierstoffoberfläche können die dazwischenliegenden Trockenzonen durch zwei unterschiedliche elektrohydrodynamische Mechanismen überbrückt werden. Eine Möglichkeit ist die Bildung von Wasserpfaden. Eine weitere Möglichkeit ist eine Verformung der Tropfen, die ein spontanes Zusammenfließen ermöglicht. Bei einem kritischen Abstand der Tropfen zueinander, der von der Geometrie der Tropfen und den Feststoffeigenschaften abhängt, können sich Wasserpfade zwischen benachbarten Tropfen ausbilden. Dieses Phänomen wird durch das elektrische Feld hervorgerufen und ist die Folge einer Instabilität an singulären Tropfen. Nach der Bildung eines gemeinsamen Wasserpfades zwischen zwei Tropfen entfernen sich die Tropfen voneinander und bewegen sich in entgegengesetzte Richtungen. Dies weist auf abstoßende Kräfte hin, die eventuell über einen Ladungsaustausch mit Hilfe des Wasserpfades hervorgerufen werden. Aus der verbleibenden Flüssigkeitsspur können sich Satellitentropfen formieren.

Ist der Abstand benachbarter Tropfen sehr gering, kann eine Vereinigung der Tropfen und die Bildung eines neuen größeren Tropfens aus den zuvor singulären Tropfen beobachtet werden. Eine spontane Vereinigung von zwei benachbarten singulären Tropfen kann auch ohne die Anwesenheit eines elektrischen Feldes beobachtet werden. Hierzu sind allerdings geringere Abstände erforderlich. In [99] wird dieses Verhalten mit einer Minimierung der Oberflächenenergien begründet. Der neu entstandene Tropfen hat eine geringere Oberflächenenergie als die beiden

zuvor separierten Tropfen. Die benötigte Energie zur Vereinigung der beiden Tropfen wird aus der eingesparten Oberflächenenergie bezogen. Die Vorgänge einer Tropfenvereinigung werden somit durch die Anwesenheit eines elektrischen Feldes begünstigt, da selbst Abstände, die ohne Feldeinfluß nicht zu einer Tropfeneinigung führen, im elektrischen Feld überbrückt werden können. Der kritische Abstand zwischen den Tropfen, der zu einem Zusammenfließen führt, ist bei Gleichspannung geringer als bei sinusförmiger Wechselspannung mit entsprechend gleicher Amplitude.

Aus den Untersuchungen wird deutlich, daß die Tropfengeometrie und die Plazierung der Tropfen zueinander im elektrischen Feld einen großen Einfluß auf das Verhalten haben. Aus diesem Grund können bei der Simulation von elektrohydrodynamischen Vorgängen nur Feld- und Kräfteberechnungen angewendet werden, die eine Tropfenform nachbilden und diese in die Berechnungen einbeziehen, wie dies in dieser Arbeit gezeigt wurde.

## 8.2 Eine Erweiterung des Alterungsmodells

Nach [45] gibt es zwei unterschiedliche physikalische Mechanismen, die auf Isolierstoffoberflächen zu einem Überbrücken der Isolierstrecke führen. Dies sind einerseits elektrohydrodynamische Vorgänge und andererseits Entladungserscheinungen. Beide können unabhängig voneinander zu einem Überschlag der Isolierstrecke führen, aber auch gleichzeitig als Kombination auftreten.

In der Alterungsfrühphase von polymeren Isolierstoffen ist den elektrohydrodynamischen Vorgängen größere Bedeutung zuzuschreiben als den Überschlagsmechanismen, da in einer sehr frühen Phase der Alterung Entladungserscheinungen zunächst gering sind. Diese setzen vermehrt nach einer Umbildung von tropfenförmigen Belägen zu flächenförmigen Feuchteschichten ein und werden durch chemische und physikalische Veränderungen der Flüssigkeit und des Feststoffes begünstigt. Dieser Umbildungsvorgang von singulären Tropfen zu großflächigen Feuchtebelägen kann auch durch Feldberechnungen an singulären Tropfen bestätigt werden, da mit anwachsender Tropfengröße sich die Feldstärken an den Tripelpunkten wesentlich erhöhen. Durch die Anwesenheit zahlreicher in geringem Abstand zueinander benachbarter Tropfen wird dieser Effekt der Felderhöhung weiter verstärkt. Die Wahrscheinlichkeit für Entladungserscheinungen an den Tropfen und die Überbrückung der Trockenzone in Form von Teilüberschlägen wird erhöht. Bevor sich diese Bedingungen einstellen, sind elektrohydrodynamische Vorgänge an singulären Tropfen entscheidend.

Elektrohydrodynamische Vorgänge können in Form von Tropfendeformationen, wellenartige Strukturen auf der Flüssigkeitsoberfläche, Bildung von Wasserpfeifen, Zusammenfließen von Tropfen, Tropfenteilungen und Erzeugung von neuen Tropfen auftreten. Diese dynamischen Erscheinungen begünstigen die Bildung von durchgehenden Flüssigkeitsspuren auf der Isolierstoffoberfläche und tragen zur Einleitung von Alterungsmechanismen bei. Solche Vorgänge finden auf elektrisch belasteten Oberflächen bereits im Neuzustand statt, bei denen noch kein Hydrophobieverlust festgestellt werden kann.

Die Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen können in das Alterungsmodell nach [35] eingeordnet werden. Da die oszillatorischen Oberflächenstrukturen der Tropfen von der Frequenz der anliegenden Spannung abhängen, sind diese immer gegenwärtig, sobald eine hohe Wechselspannung anliegt und eine kritische Feldstärke überschritten wird. Diese elektrohydrodynamischen Phänomene sind sehr allgemeingültig, gelten daher sowohl in der Alterungsfrüh- als auch in der Alterungsspätphase und dies bei Innenraumtechnik wie auch bei Freiluftanwendungen für Isolierstoffoberflächen im Wechsel- und Gleichfeld. Die Möglichkeiten zur Unterdrückung einer Überbrückung der Isolierstrecke kann bei den hydrodynamischen Prozessen eingegriffen werden, während Entladungserscheinungen kaum gestoppt werden können.

Die Überbrückungen der Trockenzonen können durch eine Unterbindung der Tropfenbewegungen vermieden oder zumindest durch eine Erschwerung der Tropfenbewegungen realisiert werden. Dabei kann sowohl auf die Flüssigkeit als auch auf den Feststoff Einfluß genommen werden. Da bei realen Betriebsmitteln der Feuchteinfluß und die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe der Flüssigkeit kaum beeinflußt werden können, sind die Anforderungen an den Isolierwerkstoff um so höher. Dies gilt besonders für die Anwendungen in der Innenraumtechnik, da hier die Betriebsmittel dauerhaft mit höheren Feldstärken betrieben werden als in der Freilufttechnik.

Es sollten Isolierwerkstoffe mit Eigenschaften gewählt werden, die den elektrohydrodynamischen Vorgängen entgegenwirken. Dies kann durch hydrophobe Isolierwerkstoffe geschehen, da auf diesen die Tropfen eine kugelhähnliche Form bilden, die geringere Oberflächenbereiche bedecken als ellipsenförmige Tropfen. Durch eine kugelförmige Tropfenform wird zusätzlich das Abrollverhalten der Tropfen an geneigten Oberflächen begünstigt, so daß der Isolierstoffoberfläche Feuchte entzogen werden kann, indem der Tropfen sich von der Isolierstoffoberfläche entfernt. Zusätzlich könnte der noch nicht eingesetzte Lotus-Effekt in der elektrischen Energietechnik weitere Vorteile erzielen. Auf einer Isolierstoffoberfläche mit Lotuseffekt können Ablagerungen durch abrollende Tropfen wegtransportiert werden, so daß sich die Volumenleitfähigkeit der zurückbleibenden Flüssigkeit nicht erhöht.

Die in dieser Arbeit analysierten elektrohydrodynamischen Vorgänge an singulären Tropfen haben in der Alterungsfrühphase eine große Bedeutung, da zunächst eine Umbildung der singulären Tropfen in flächige Fremdschichtbeläge stattfindet, bevor Teilentladungen und Überschlagsmechanismen einsetzen. In Bild 8.1 sind die Ergebnisse der Untersuchungen in den Ablauf der Alterungsfrühphase nach dem Modell von [35] eingeordnet.

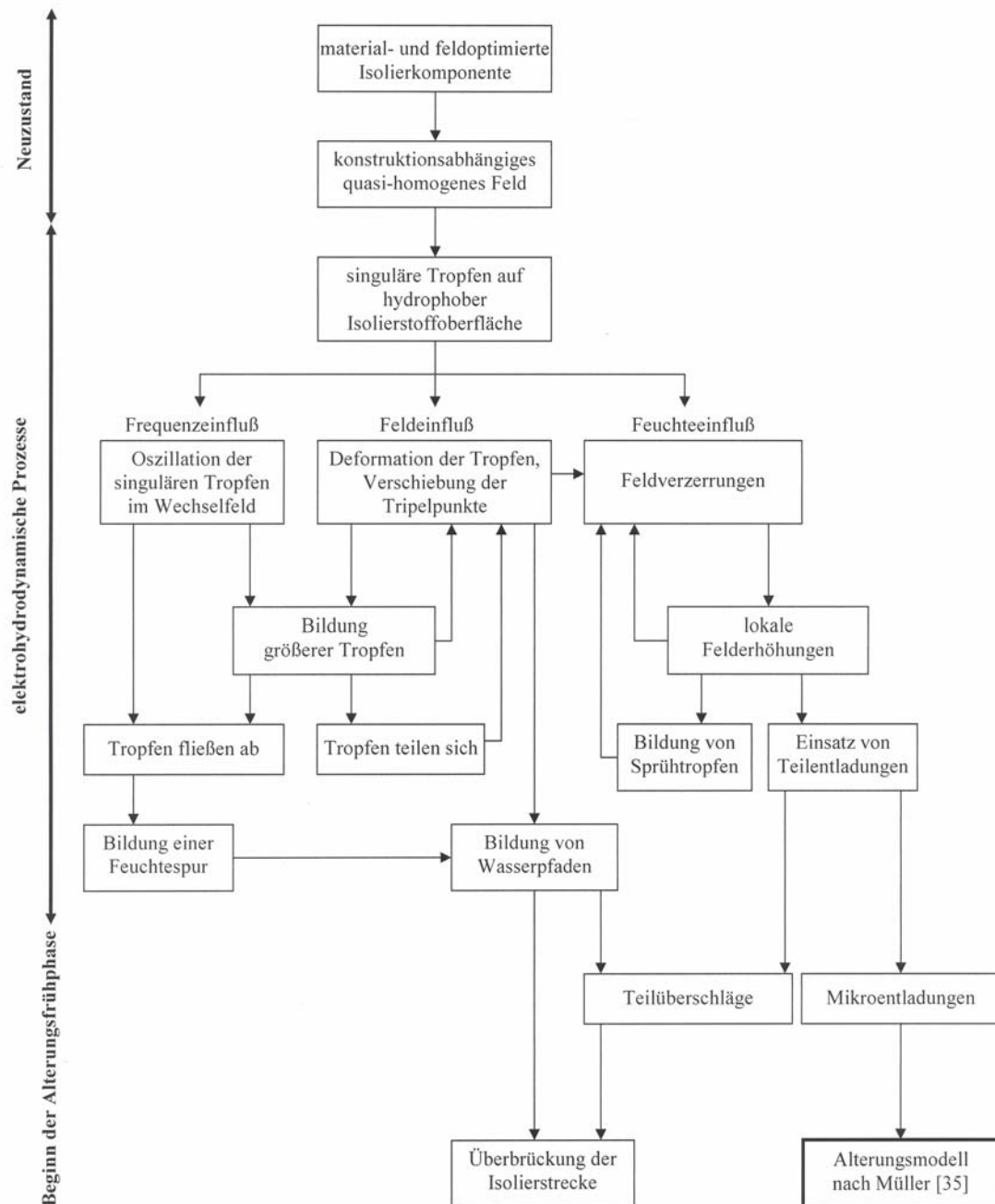


Bild 8.1: Erweitertes Alterungsmodell zur Modellierung der Alterungsfrühphase fester polymerer Isolierstoffe



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von physikalischen und chemischen Eigenschaften von Wasser wurde die Bedeutung eines einzelnen Wassermoleküls im Wasserkreislauf der Erde beschrieben. Durch fallenden oder gefallenen Niederschlag gelangt das Wasser mit darin gelösten Inhaltsstoffen auf die Isolierstoffoberfläche elektrischer Betriebsmittel der Energietechnik. Die Feuchte kann bei gleichzeitiger Anwesenheit eines elektrischen Feldes eine physikalische und chemische Veränderung des Isolierwerkstoffes verursachen. Ist diese Veränderung irreversibel, setzt die Alterung des Isolierstoffes ein. In einer entwickelten Modellvorstellung für polymere Isolierstoffe [35] wird zwischen der Alterungsfrüh- und der Alterungsspätphase unterschieden. Zur Klärung von Phänomenen, die in der Alterungsfrühphase ablaufen und einen Verlust der Hydrophobie verursachen, wurde in dieser Arbeit der Frage nachgegangen, wie sich singuläre Tropfen auf polymeren Isolierstoffoberflächen im elektrischen Feld verhalten. Bei dieser Fragestellung interessierten elektrohydrodynamische Prozesse an singulären Tropfen und Vorgänge, die zwischen benachbarten singulären Tropfen stattfinden.

Aus der Vielzahl der möglichen Parameter, die bei einer Anordnung der drei Phasen Feststoff, Flüssigkeit und Gas als Grenzflächenproblem entstehen, wurden realitätsnahe Parameter ausgewählt. Dabei wurde der Bezug zu realen Isolieranordnungen berücksichtigt, die unter erschwerten Bedingungen eingesetzt sind. Für experimentelle Untersuchungen wurden Vereinfachungen bezüglich der Geometrie des Isolators getroffen und die Vielfalt der Parameter eingegrenzt. Es wurde eine geeignete Versuchstechnik entwickelt, die es ermöglicht, Tropfen im elektrischen Feld zu analysieren, ohne durch die Beobachtungen einen Einfluß auf das Tropfenverhalten zu nehmen. Dies wird sowohl durch die gewählte optische Diagnosetechnik als auch durch die Wahl der Prüfkörpergeometrie gewährleistet.

Auf einen quaderförmigen Modellisolator, zuvor durch Feldberechnungen optimiert und im eigenen Gießlabor hergestellt, wurden singuläre Tropfen mit definiertem Volumen und definierter Volumenleitfähigkeit gezielt auf der Prüfkörperoberfläche aufgesetzt. Das Verhalten der Tropfen wurde mit zwei optischen

Diagnoseeinrichtungen, nämlich einem Randwinkel-Meßsystem und einem Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem, im parallel zur Prüfkörperoberfläche verlaufenden elektrischen Feld analysiert.

Es wurden Verdunstungsvorgänge, Bewegungsvorgänge an singulären Tropfen und Vorgänge zwischen mehreren singulären Tropfen bei Gleich- und Wechselfeldbeanspruchung untersucht. Dabei wurden Verformungen an den Tropfen, Oberflächenstrukturen auf der Flüssigkeitsoberfläche, Randwinkelhysteresen, Wasserspuren zwischen Tropfen, die Entstehung von Satellitentropfen und Sprühtropfen, sowie die Teilung eines singulären Tropfens aufgrund seiner Bewegung festgestellt. Für das Einsetzen von Oberflächenwellen auf der Tropfenoberfläche wurde eine charakteristische Spannung definiert und die Einflußparameter, wie Tropfengröße und Materialeigenschaften, in Relation gesetzt. Für die drei geometrischen Kenngrößen eines Tropfenprofils, nämlich den Radius, den Randwinkel und die Tropfenhöhe, wurden Kategorien zur Beschreibung eines singulären Tropfens im elektrischen Wechsel- und Gleichfeld vorgeschlagen. Eine Kombination der Kenngrößen in Abhängigkeit von der Zeit kann das Tropfenverhalten vollständig beschreiben. Die systematisierten Verhaltensmuster konnten anhand von Beispielen aus den experimentellen Untersuchungen verdeutlicht werden.

Feld- und Kräfteberechnungen gaben weitere wichtige Informationen zur Erklärung des Tropfenverhaltens. Die berechneten Kräfte an den Tripelpunkten werden im Experiment in Form von ellipsenförmigen Verformungen der Tropfen in Feldrichtung beobachtet. Der Einfluß der Tropfengröße auf die lokale Felderhöhung an den Tripelpunkten kann ebenfalls experimentell bestätigt werden.

Das Zusammenfließen von singulären Tropfen wird durch elektrohydrodynamische Prozesse begünstigt, bevor Alterungserscheinungen auf dem Isolierwerkstoff auftreten. Das analysierte dynamische Verhalten von singulären Tropfen im elektrischen Feld liegt somit dem Alterungsprozeß in einer sehr frühen Phase der Alterung zugrunde. Die untersuchten Prozesse sind im Laufe der Alterung ständig präsent, verlieren aber an Bedeutung, da die Wahrscheinlichkeit zur Überbrückung der Isolierstrecke durch Entladungserscheinungen im Laufe der Alterungsphase zunimmt.

Mit dieser Arbeit konnte ein Beitrag zur Klärung von Alterungsmechanismen von polymeren Isolierstoffoberflächen geleistet werden. Die Ergebnisse der untersuchten elektrohydrodynamischen Prozesse auf hydrophoben Isolierstoffoberflächen konnten in das von [35] entwickelte Alterungsmodell für Isolierstoffalterungen in der Alterungsfrühphase eingearbeitet werden.

Die Untersuchungen wurden an Epoxidharz-Formstoffsyste men durchgeführt, einer der eingesetzten polymeren Isolierwerkstoffe in der Hochspannungstechnik. Eine sinnvolle Erweiterung der Materialparameter für zukünftige Untersuchungen ist die Analyse des Tropfenverhaltens auf Silikonelastomeren, die ebenfalls in der Hochspannungstechnik für zahlreiche Anwendungen eingesetzt werden. Es ist zu erwarten, daß Silikonelastomer-Isolierstoffoberflächen aufgrund anderer Grenzflächenkräfte zwischen Feststoff und Flüssigkeit ein modifiziertes elektrohydrodynamisches Verhalten von singulären Tropfen hervorrufen. Dies ist für die Ausbildung von Oberflächenwellen auf der Tropfenoberfläche offensichtlich, da diese durch die Bogenlänge des Tropfenprofils beeinflußt werden. Auch die Art der Flüssigkeit ist weiter zu variieren. Die Entstehung von Säuren während der Alterung von Isolierstoffoberflächen ist ein wesentlicher Faktor zur Beschleunigung der Oberflächenzersetzung. Für die experimentellen Untersuchungen ist daher eine große Anzahl von Prüfkörpern nötig, da nach jeder Beanspruchung die untersuchte Oberfläche durch die Anwesenheit der Säure verändert wird.

Eine Weiterentwicklung der bisher eingesetzten Diagnosetechnik kann zusätzliche Details zum Verhalten singulärer Tropfen liefern. Eine Erhöhung der Spannungsamplitude am Prüfkörper kann unter Beibehaltung der Reproduzierbarkeit der Spannungserzeugung mit Hilfe einer Modifizierung des bisher verwendeten Systems zur Erzeugung der Wechselfspannung realisiert werden. Eine Erweiterung des eingesetzten Hochgeschwindigkeits-Kamerasystems ermöglicht eine Verdopplung der Aufnahmezeit von bisher zwei Sekunden auf vier Sekunden bei gleicher Aufnahmerate. Auf diese Weise könnten Phänomene zwischen singulären Tropfen noch detaillierter beobachtet und analysiert werden. Zur weiteren Untersuchung des Resonanzverhaltens an singulären Tropfen ist es notwendig, den untersuchten Frequenzbereich der Hochspannung hin zu niedrigeren Werten zu erweitern. So kann der Übergang des unterschiedlichen elektrohydrodynamischen

Verhaltens der singulären Tropfen bei Gleich- und Wechselspannung näher analysiert werden. Die Erzeugung niederfrequenter hoher Wechselspannungen kann beispielsweise durch den Austausch des bisher eingesetzten Mittelspannungswandlers im Hochspannungskreis realisiert werden. Dieser könnte durch einen Wandler, der im Bahnbetrieb eingesetzt wird und für Frequenzen von  $f = 16 \frac{2}{3}$  Hz ausgelegt ist, erfolgen.

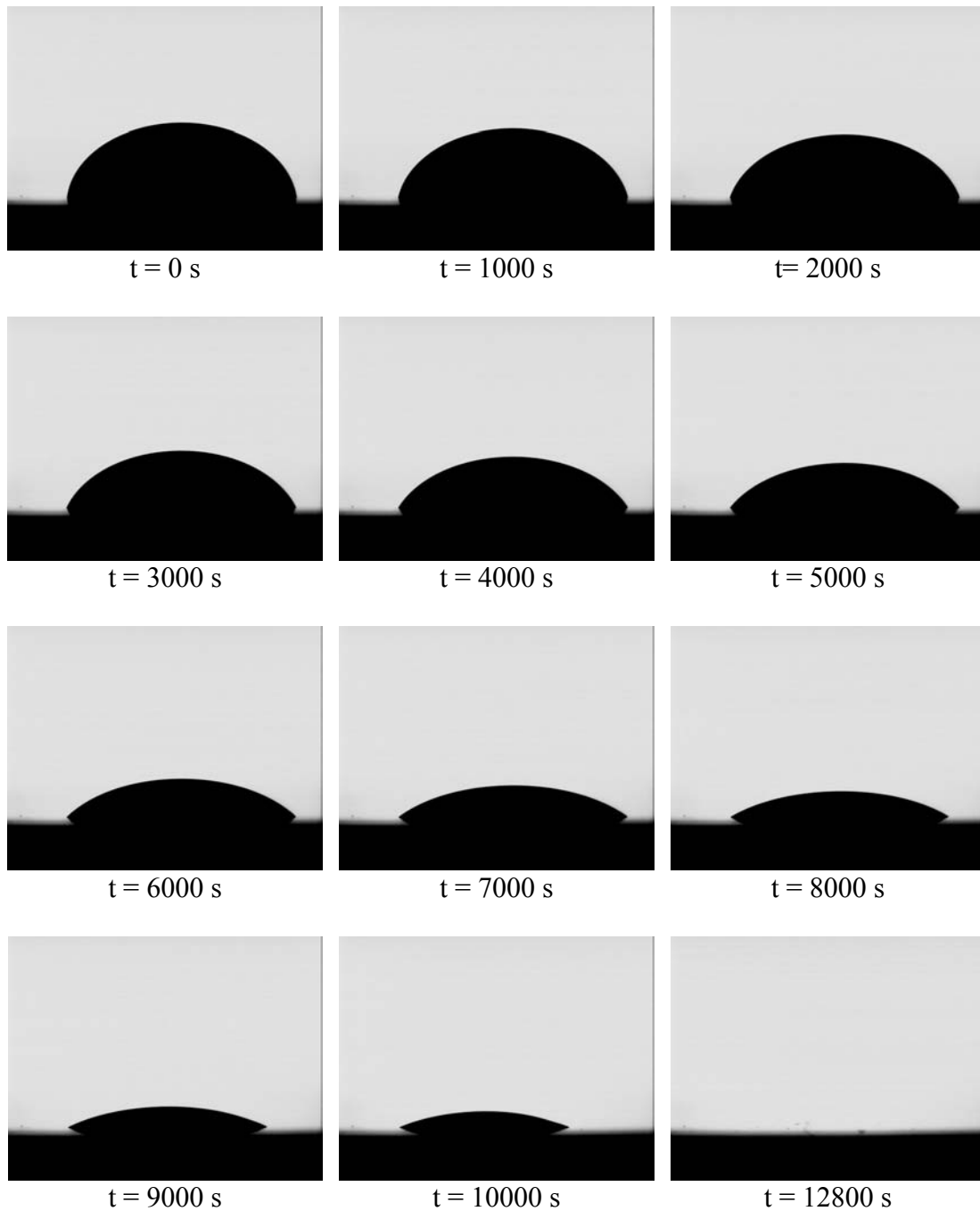
Zur Untersuchung von Entladungserscheinungen an Tropfen, die in einer späteren Phase der Alterungsfrühphase auftreten, kann die bisher eingesetzte Versuchstechnik mit einem weiteren Diagnosesystem zur Messung von Teilentladungen kombiniert werden. Bei den bisher durchgeführten Untersuchungen können Teilentladungen an Tropfen elektrisch diagnostiziert werden. Diese werden jedoch bei einer Erhöhung der anliegenden Spannung und bei gealterten Isolierstoffoberflächen intensiviert und sind somit elektrisch und optisch erfaßbar.

Weitere Feld- und Kräfteberechnungen, die noch detaillierter die Verformungen der Tropfen simulieren, können weiterhin zur Klärung von Ursachen der Tropfendeformierungen beitragen. Eine Entkopplung zwischen dem äußeren angelegten elektrischen Feld und dem Feld, das durch die Anwesenheit der Tropfen verändert wird, kann nur mit Hilfe der Simulationsrechnungen herausgearbeitet werden. In den experimentellen Untersuchungen ist immer die Überlagerung beider Effekte feststellbar. Simulationen an realen geometrisch komplexen Isolatoren mit definiert verteilten singulären Tropfen können als Ziel zukünftiger Simulationsrechnungen angesehen werden.

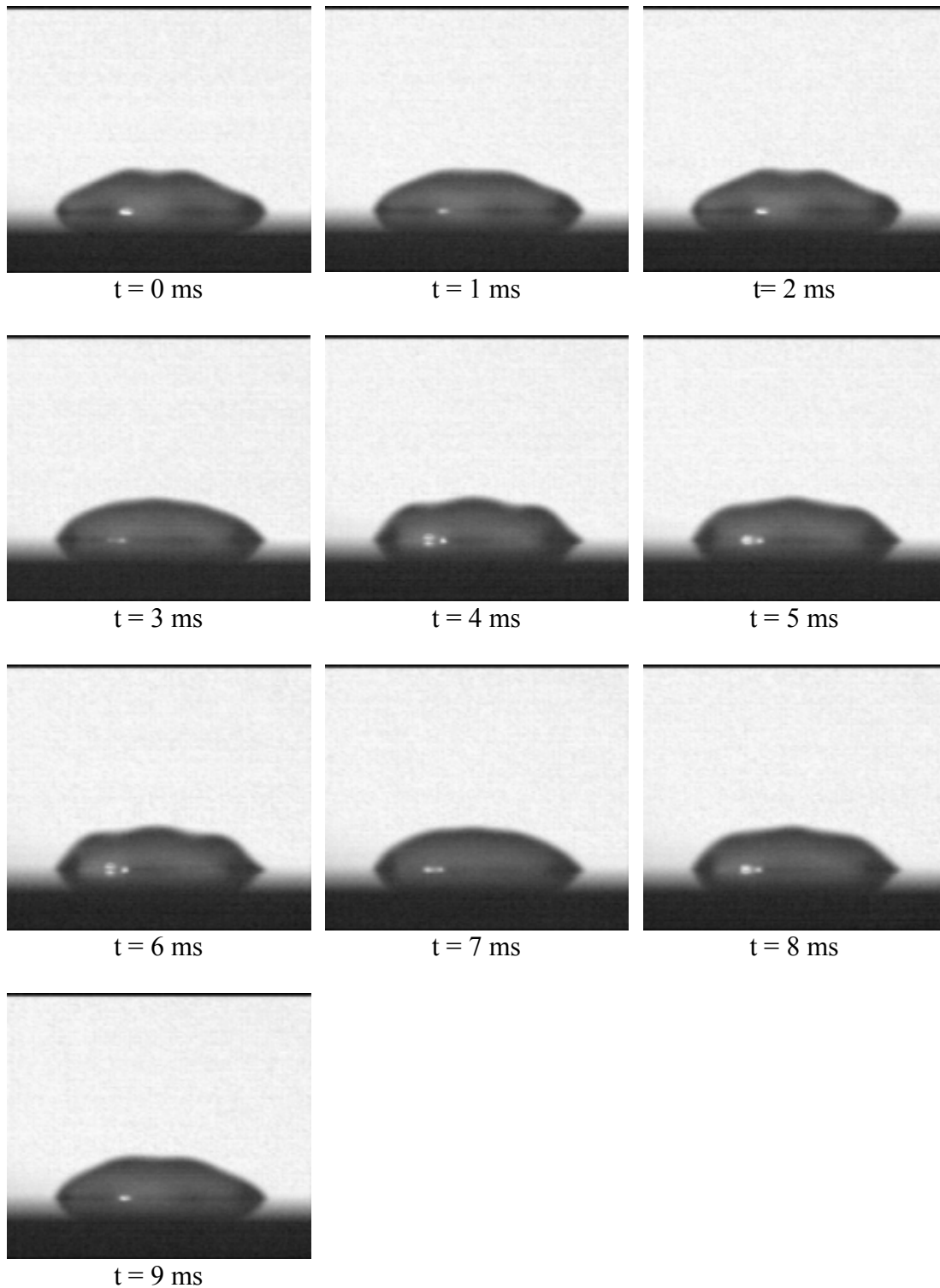
Zur weiteren Annäherung der experimentellen Untersuchungen an reale Bedingungen sind zusätzlich Untersuchungen an gekrümmten Oberflächen notwendig, bevor im nächsten Schritt reale Isolierkomponenten mit geeigneten und gleichzeitig gekrümmten Oberflächen untersucht werden.



# Bildteil

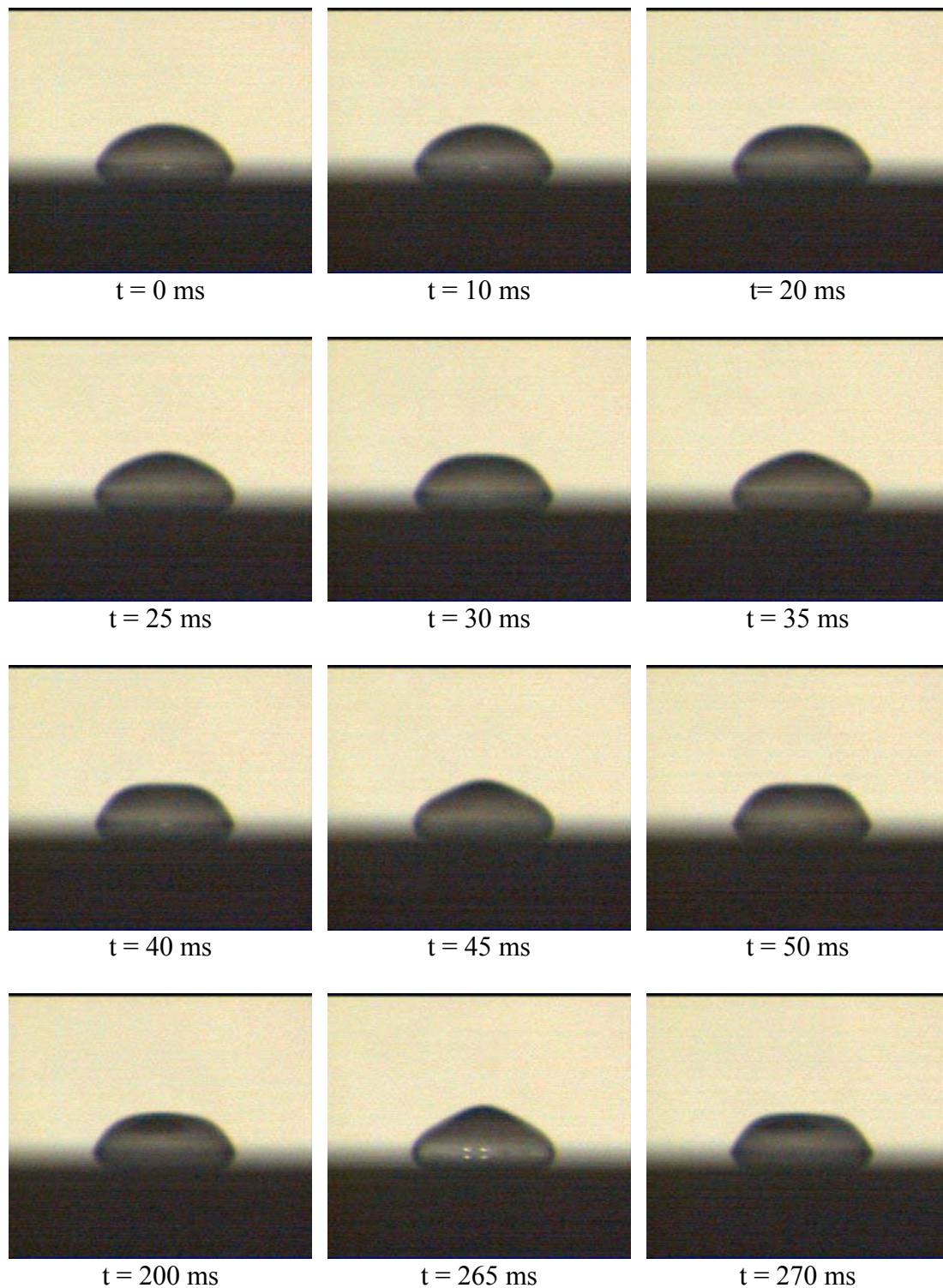


Bildsequenz 1: Verdunstungsvorgang eines Wassertropfens ohne elektrisches Feld  
Parameter:  $V = 100 \mu\text{l}$ , doppelt dest.  $\text{H}_2\text{O}$ , Material 1,  
Umgebungstemperatur  $\vartheta = 21^\circ \text{C}$

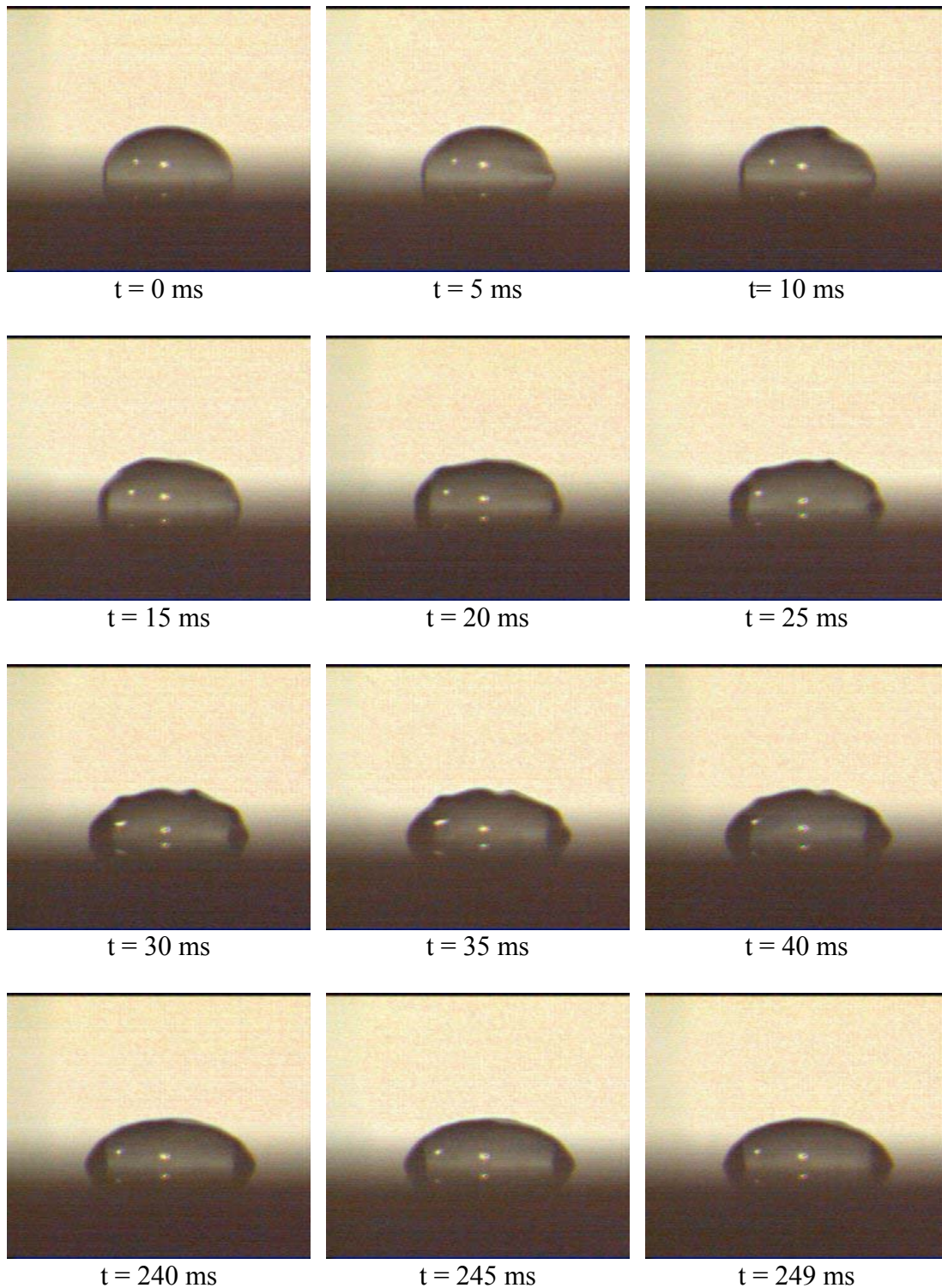


Bildsequenz 2: Oberflächenstrukturen innerhalb einer halben Spannungsperiode  
 $V = 100 \mu\text{l}$ , doppelt dest.  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $x = 0\text{mm}$ ,  $y = 0\text{mm}$ , Material 1,  
 $\hat{u} = 13\text{ kV}$ ,  $f = 50\text{ Hz}$



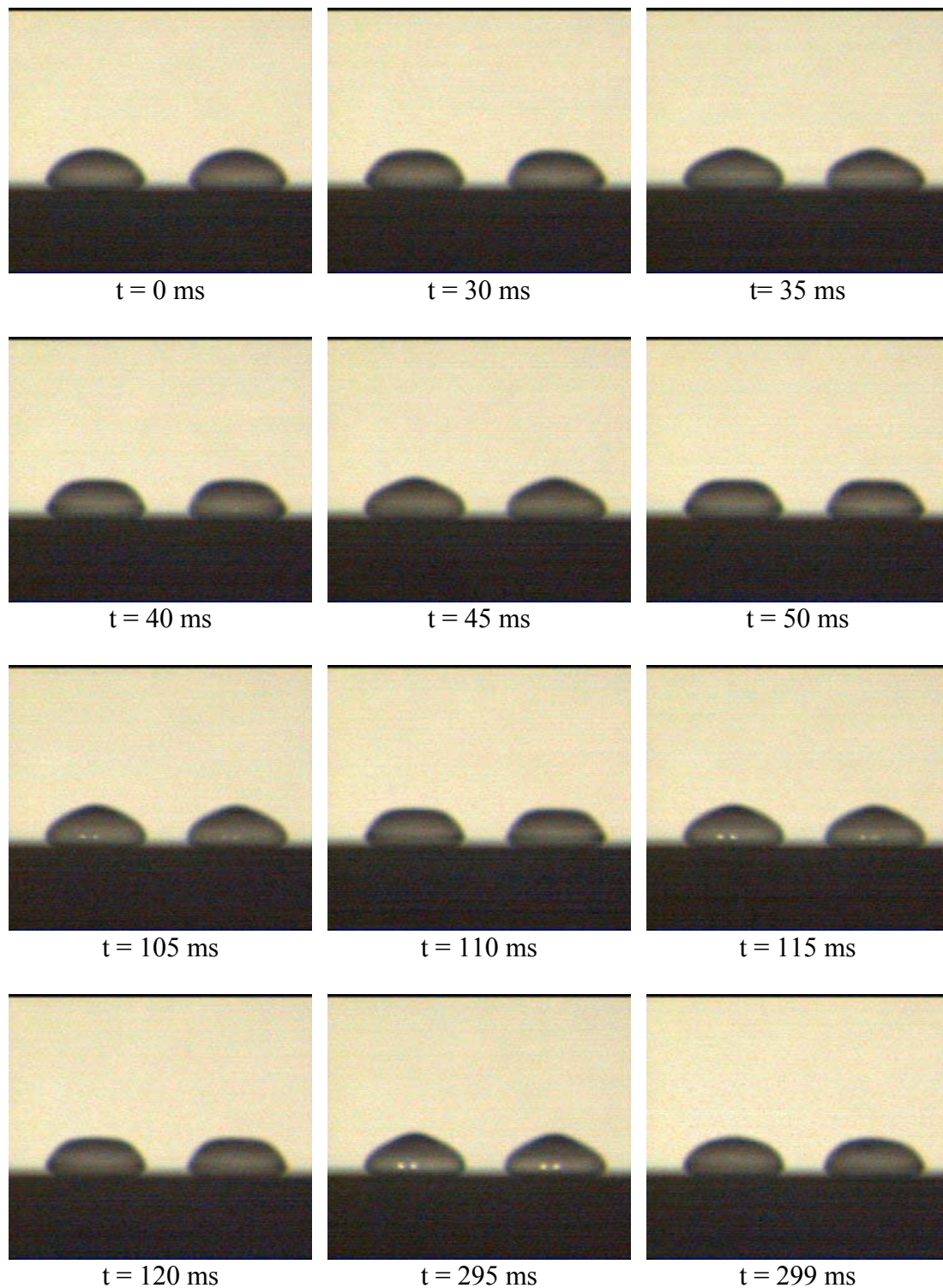


Bildsequenz 3: Oberflächenstrukturen in aufeinander folgenden Spannungsperioden  
 $V = 50 \mu\text{l}$ , doppelt dest.  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $x = 0\text{mm}$ ,  $y = 0\text{ mm}$ , Material 1,  
 $\hat{u} = 13\text{ kV}$ ,  $f = 50\text{ Hz}$

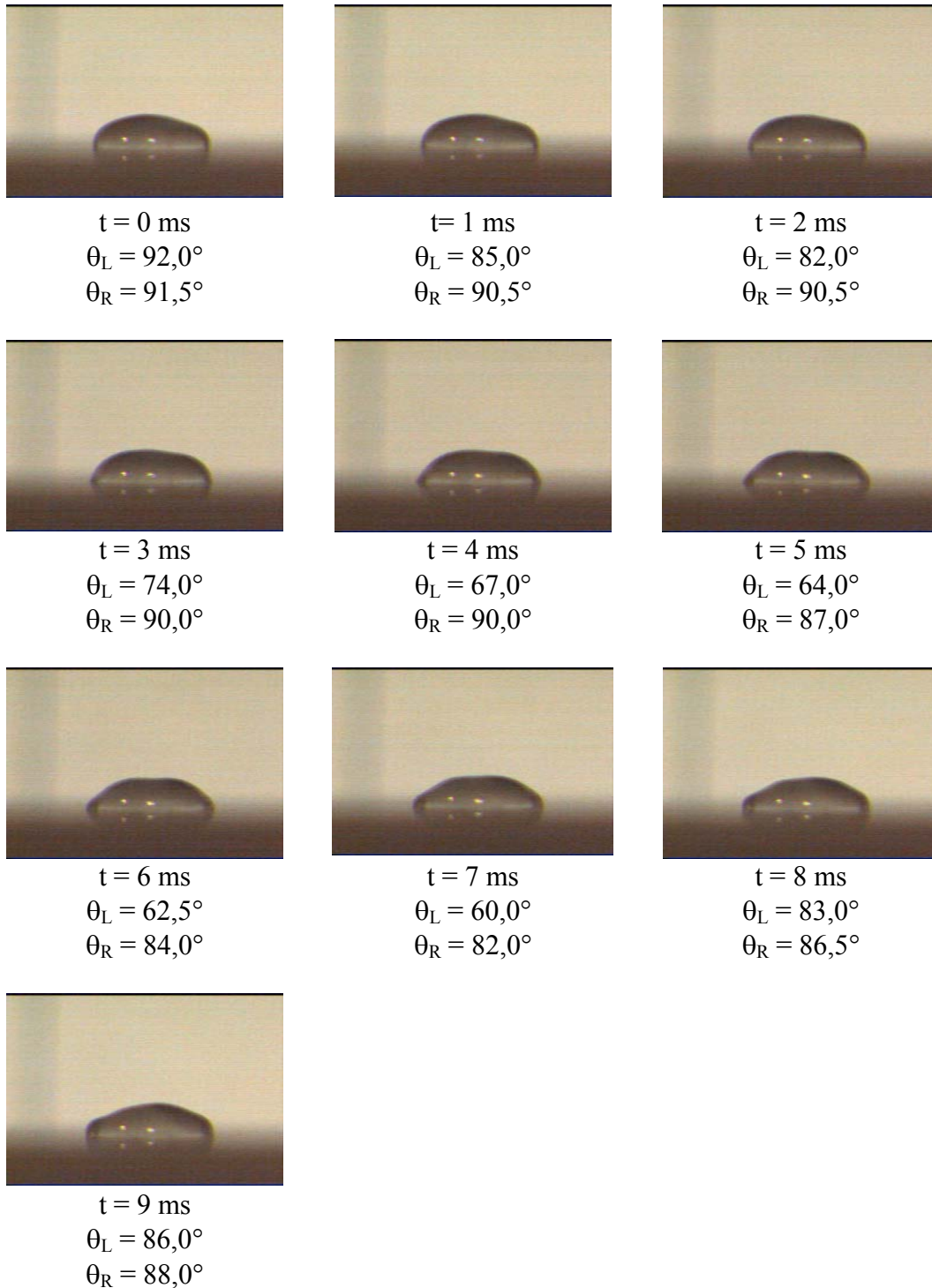


Bildsequenz 4: Oberflächenstrukturen bei einem unsymmetrischen Tropfenverhalten  
 $V = 100 \mu\text{l}$ , doppelt dest.  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$ , Material 2,  
 $\hat{u} = 11 \text{ kV}$ ,  $f = 200 \text{ Hz}$

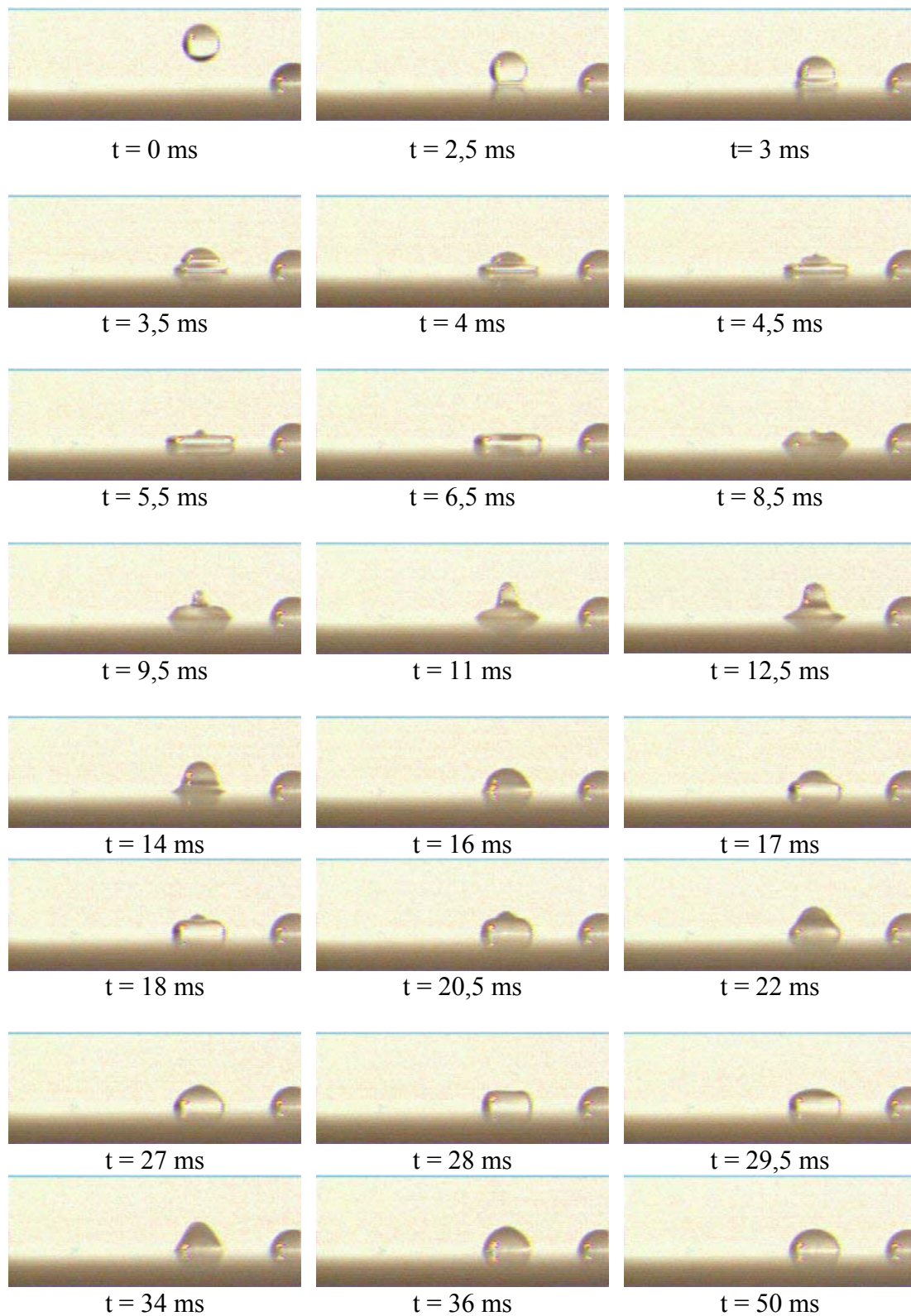




Bildsequenz 5: Gleichmäßige Oberflächenstrukturen bei zwei Tropfen  
 $V_1 = V_2 = 50 \mu\text{l}$ ,  $\kappa = 10000 \mu\text{S/cm}$ ,  $x_1 = -10 \text{ mm}$ ,  $y_1 = 0 \text{ mm}$ ,  
 $x_2 = +10 \text{ mm}$ ,  $y_2 = 0 \text{ mm}$  Material 1,  $\hat{u} = 13 \text{ kV}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$

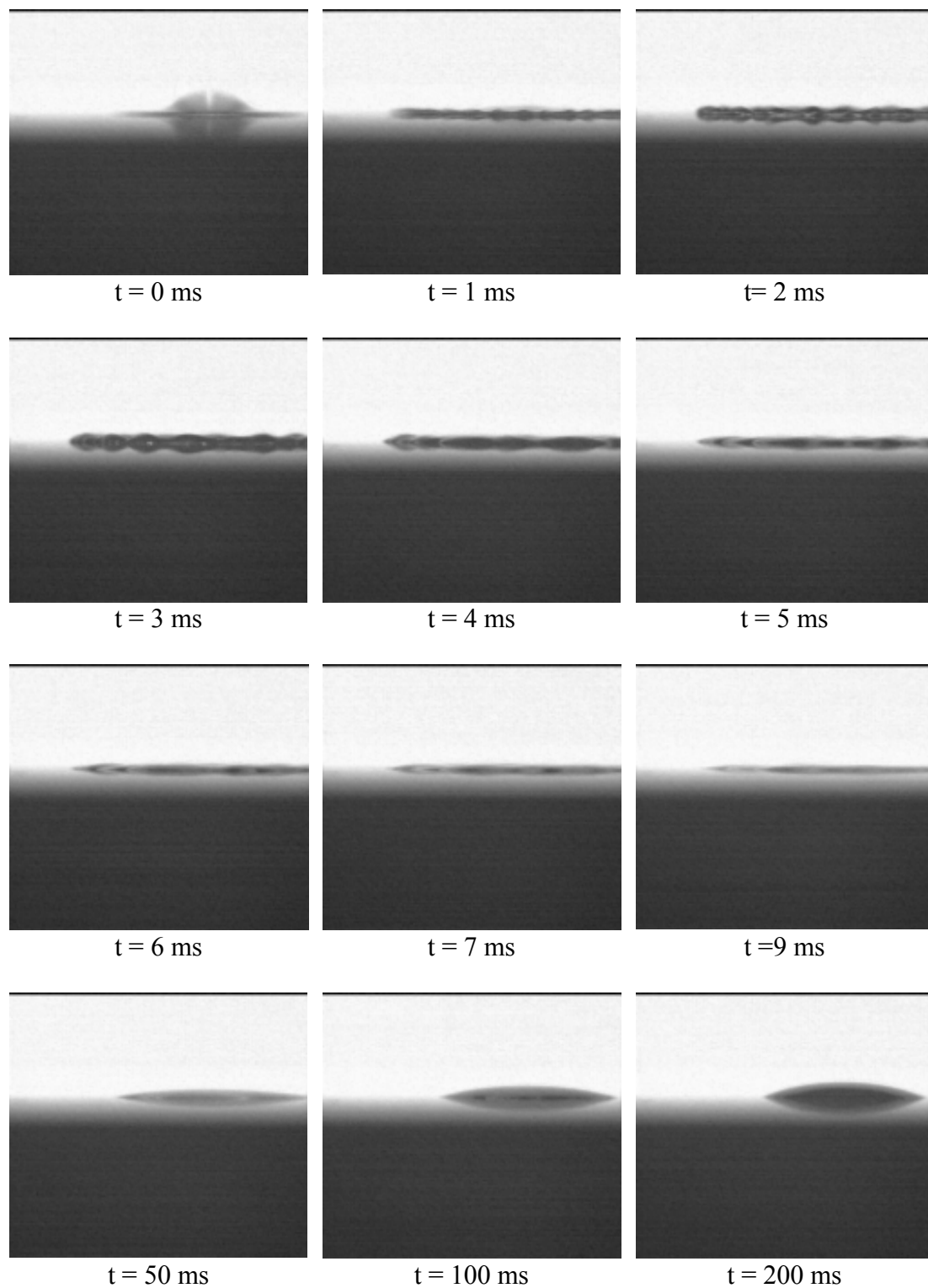


Bildsequenz 6: Änderung des rechten und linken Randwinkels innerhalb einer halben Spannungsperiode  
 $V = 100 \mu\text{l}$ , doppelt dest.  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$ , Material 2,  
 $\hat{u} = 13 \text{ kV}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$

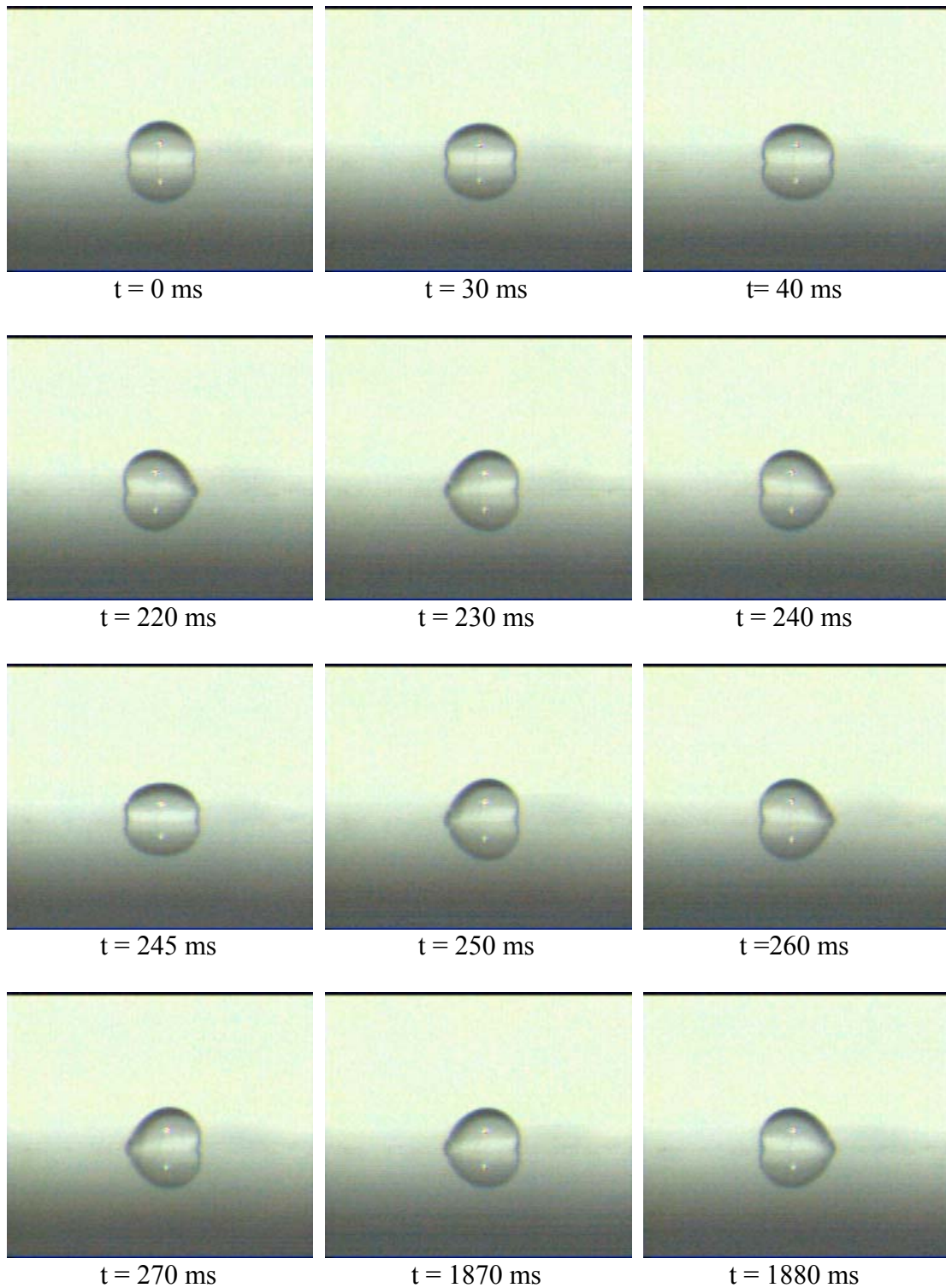


Bildsequenz 7: Auftreffen eines Tropfens auf einen spannungsfreien Prüfkörper nach einem freien Fall aus etwa 0,5 m Höhe  
 $V \approx 3 \mu\text{l}$ , doppelt dest.  $\text{H}_2\text{O}$ , Material 2

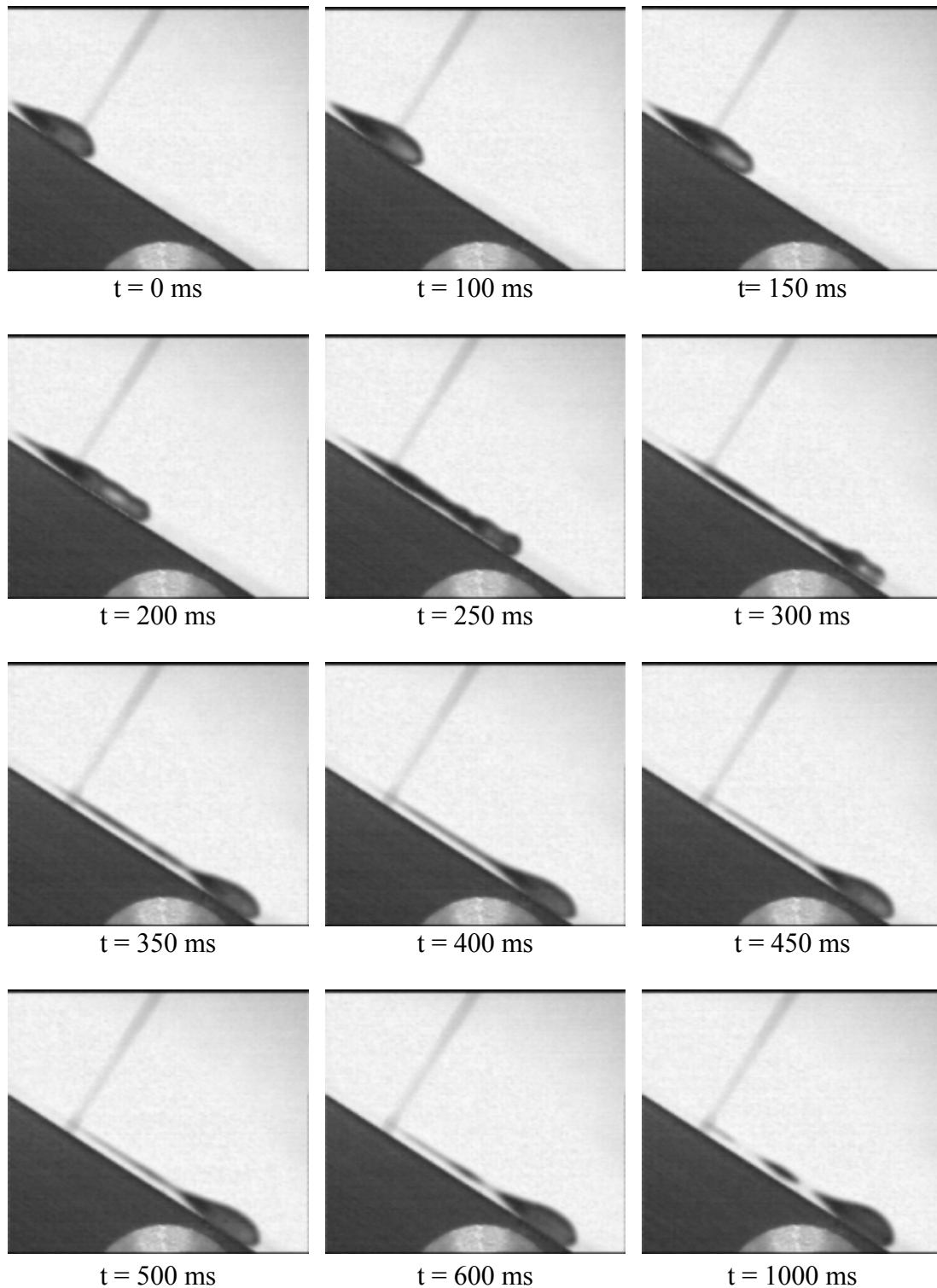




Bildsequenz 8: Auftreffen eines Tropfens auf einen spannungsfreien Prüfkörper nach einem freien Fall aus etwa 0,5 m Höhe  
 $V \approx 50 \mu\text{l}$ , doppelt dest.  $\text{H}_2\text{O}$ , Material 1

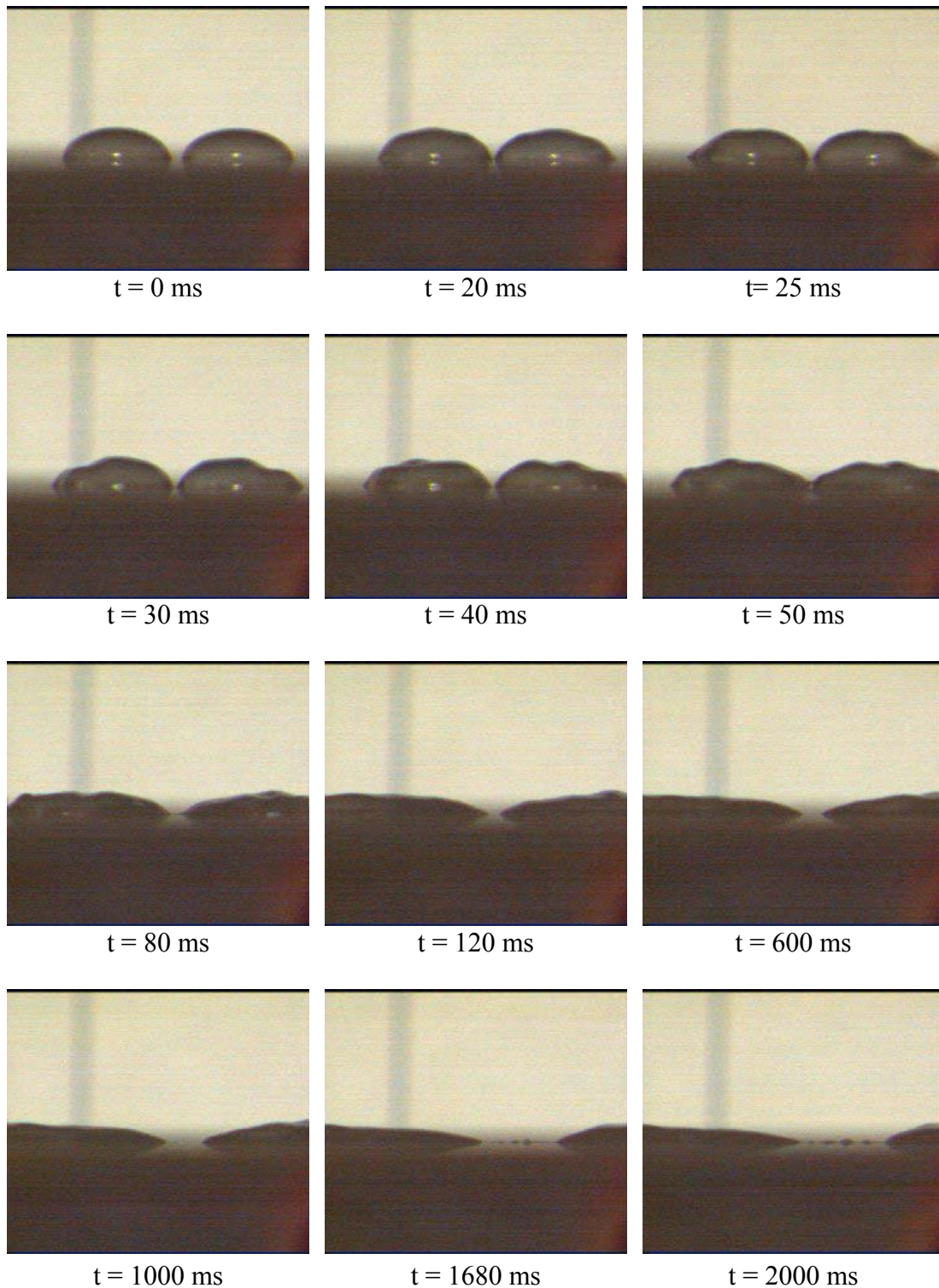


Bildsequenz 9: Prüfkörper mit Lotusbeschichtung  
V = 10  $\mu$ l, doppelt dest. H<sub>2</sub>O, x = 0 mm, y = 0 mm, Material 4  
 $\hat{u}$  = 13 kV, f = 50 Hz

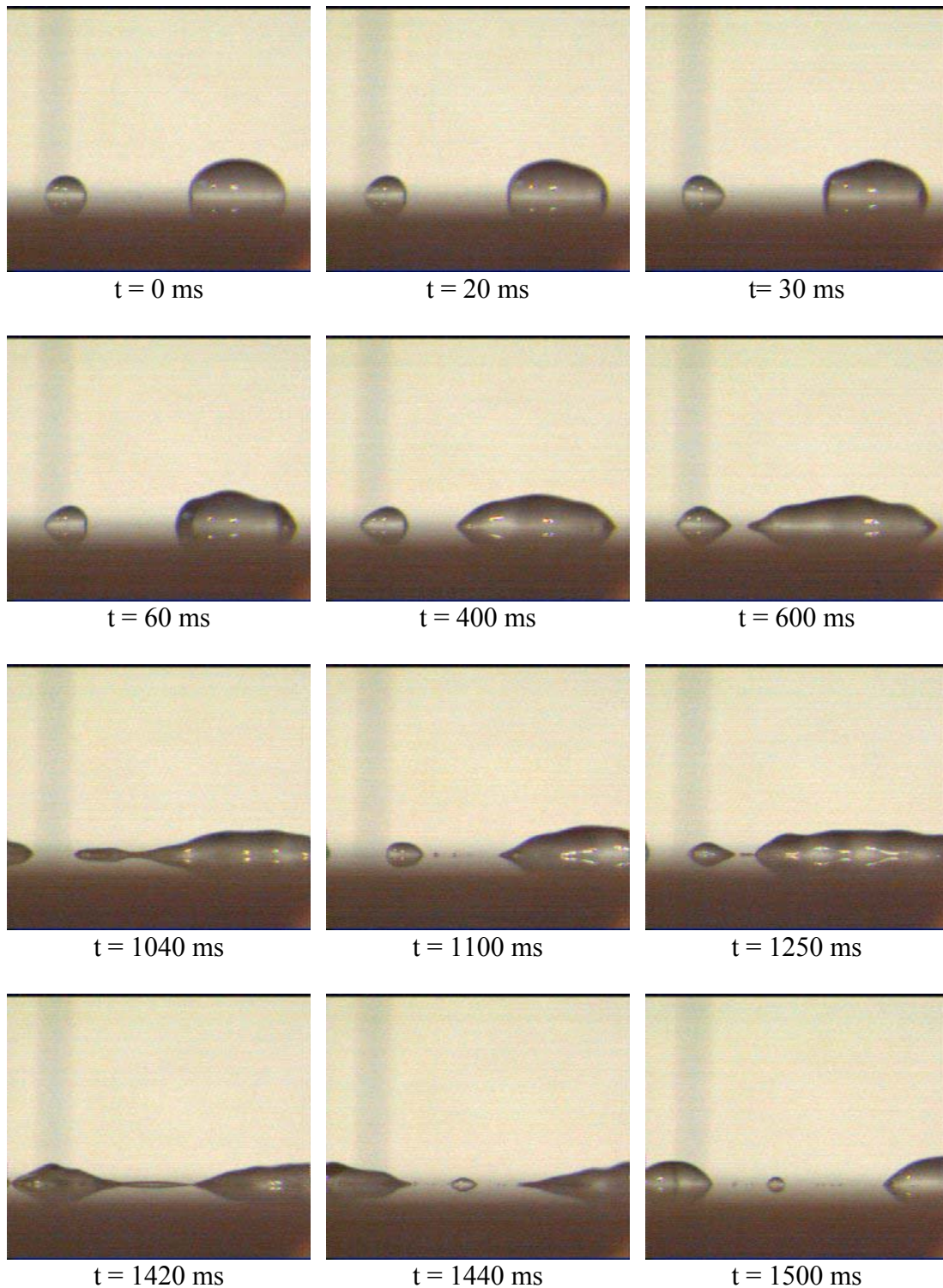


Bildsequenz 10: Abrollvorgang eines Tropfens auf einer schiefen Ebene mit einem Neigungswinkel von  $32^\circ$  gegen die Horizontale  
 $V = 50 \mu\text{l}$ , doppelt dest.  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$ , Material 1,  
 $\hat{u} = 13 \text{ kV}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$





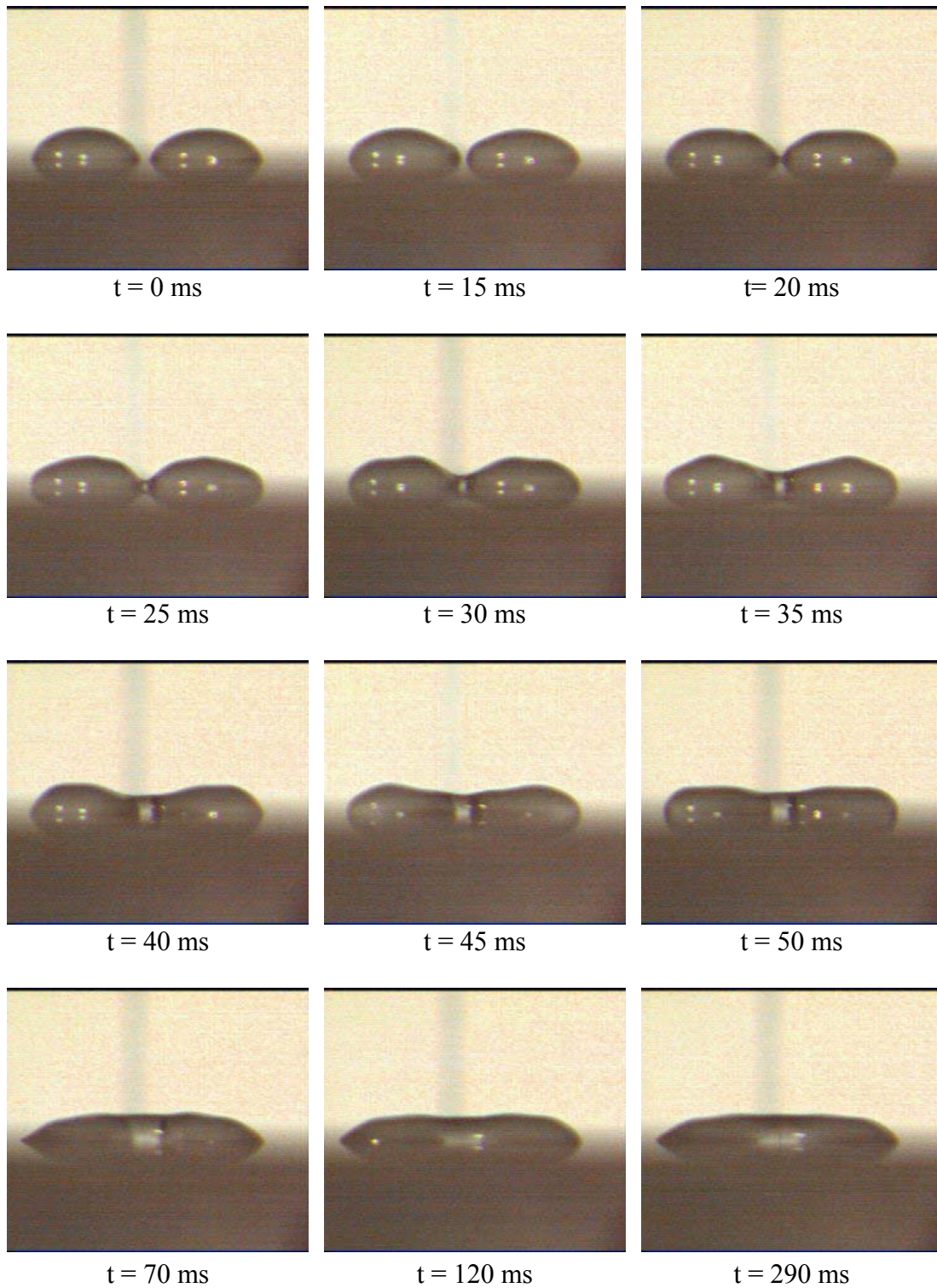
Bildsequenz 11: Bildung von Flüssigkeitsspuren zwischen zwei Tropfen  
 $V_1 = V_2 = 100 \mu\text{l}$ , doppelt dest.  $\text{H}_2\text{O}$ ,  
Abstand der Tripelpunkte 1 mm, Material 2,  $\hat{u} = 13 \text{ kV}$ ,  $f = 200 \text{ Hz}$



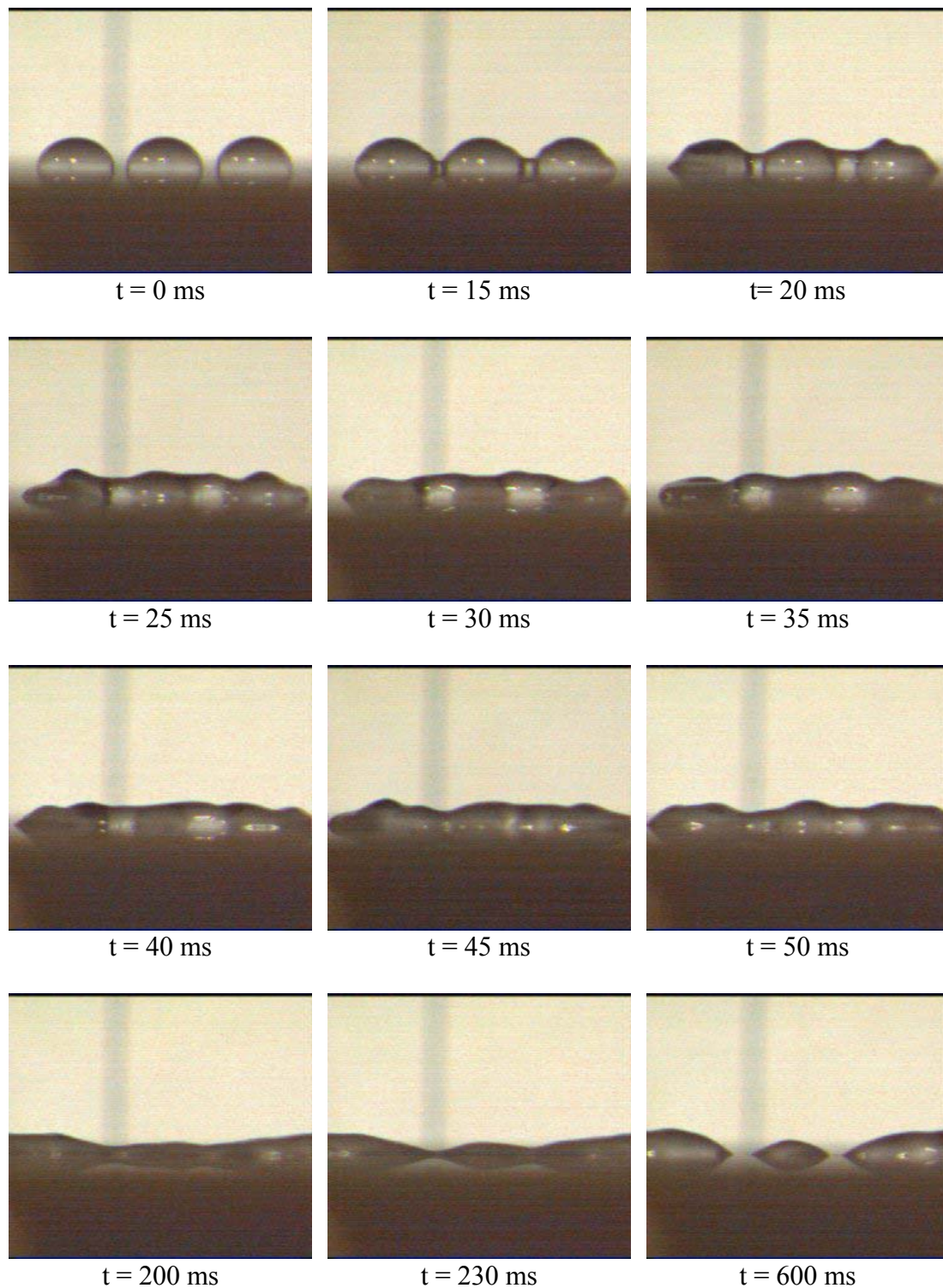
Bildsequenz 12: Bildung eines Satellitentropfens

$V_1 = 10 \mu\text{l}$ ,  $V_2 = 100 \mu\text{l}$ , doppelt dest.  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $x_1 = -5 \text{ mm}$ ,  $y_1 = 0 \text{ mm}$ ,  
 $x_2 = +5 \text{ mm}$ ,  $y_2 = 0 \text{ mm}$ , Material 2,  $\hat{u} = 13 \text{ kV}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$





Bildsequenz 13: Zusammenfließen von zwei Tropfen  
 $V_1 = V_2 = 75 \mu\text{l}$ , doppelt dest.  $\text{H}_2\text{O}$ ,  
Abstand der Tripelpunkte 1 mm, Material 1,  $\hat{u} = 13 \text{ kV}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$



Bildsequenz 14: Zusammenfließen von drei Tropfen

$V_1 = V_2 = V_3 = 50 \mu\text{l}$ , doppelt dest.  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $x_1 = -5 \text{ mm}$ ,  $y_1 = 0 \text{ mm}$ ,  
 $x_2 = 0 \text{ mm}$ ,  $y_2 = 0 \text{ mm}$ ,  $x_3 = +5 \text{ mm}$ ,  $y_3 = 0 \text{ mm}$ , Material 2,  
 $\hat{u} = 13 \text{ kV}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$



## Literaturverzeichnis

- [1] M. Saure:  
Werkstoffe und Grundbauteile der Elektrotechnik  
in Hilfsbuch der Elektrotechnik, Band 1, K. Johannsen (Herausgeber),  
AEG-Telefunken Handbuch, 3. Auflage, Frankfurt am Main, 1981
- [2] C. Brinkmann:  
Die Isolierstoffe der Elektrotechnik  
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1975
- [3] D. Kind, H. Kärner:  
Hochspannungs-Isoliertechnik  
Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, Wiesbaden, 1982
- [4] W. Mosch, W. Hauschild:  
Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid,  
Dr. A. Hüthing-Verlag, Heidelberg, Basel, 1978
- [5] H. Czichos (Herausgeber):  
Hütte – Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften  
31. Auflage, Springer Verlag, VDI-Buch, 2000
- [6] H. Janssen:  
Ursache und Lebensdauer der Hydrophobie polymerer Werkstoffe für  
Hochspannungs-Freiluftisolatoren  
Dissertation Technische Universität Braunschweig, Shaker Verlag, 1999
- [7] J. Lambrecht:  
Über Verfahren zur Bewertung der Hydrophobieigenschaften von  
Silikonelastomer-Formstoffen  
Dissertation Technische Universität Dresden, Shaker Verlag, 2001
- [8] J. Hofmann:  
Elektrische TE- und Ableitstrommessung an polymeren  
Isolierstoffoberflächen mit Tropfenbelägen zur Diagnose des  
Oberflächenwiderstandes – am Beispiel von Elastomeren  
Dissertation Technische Hochschule Zittau, 1995
- [9] M. Beyer u.a.:  
Epoxidharze in der Elektrotechnik  
Kontakt & Studium, Band 109: Elektrotechnik  
expert verlag, Grafenau, 1983

- [10] C. Neumann, K.-H. Weck:  
Störungs- und Schadensanalyse – Feedback für Diagnostik von Betriebsmitteln aus dem Netzbetrieb  
ETG-Fachbericht 87, Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 2002, in Zusatzheft S. 1...8
- [11] R. Patsch, J. Kindersberger, D. König:  
Alterung von Betriebsmitteln – ein Überblick  
ETG-Fachbericht 87, Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 2002, in Zusatzheft S. 9...16
- [12] D. König:  
Vorgänge an äußeren Grenzflächen unter erschwerten Innenraum Bedingungen  
ETG-Fachbericht 76, Einfluß von Grenzflächen auf die Lebensdauer elektrischer Isolierungen – Grundlagen, Diagnostik, Betriebserfahrungen, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 1999, S. 9...25
- [13] D. König, I. Quint:  
Multifactor Aging Mechanisms on the Surface of Model Post Insulators  
1992 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Victoria, BC, Canada, 1992, S. 664...670
- [14] D. König, W.-K. Park:  
Multifactor Longtime Surface Ageing of Model Post Insulators Processed of Different Types of Resins, Hardeners and Fillers  
1994 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Arlington, Texas, USA, 1994, S. 645...650
- [15] W.-K. Park, H.-J. Klös, D. König:  
Surface Aging of Model Post Insulators Made of Different Casting Resin Systems under Multifactor Stress  
9th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Graz, Austria, 1995, S. 3191-1...3191-4
- [16] H.-J. Klös, D. König:  
Multifactor-Surface-Tests of Organic Insulating Materials in the Early Stage of Degradation  
1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), Montréal, Québec, Canada, 1996, S. 296...299
- [17] H.-J. Klös, D. König, S. Keim, M. G. Danikas:  
Oberflächenverhalten polymerer Isolierstoffe unter „Multi-Streß-Bedingungen“ für Innenraumanwendungen  
43. Internationales Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, 1998, S. 360...363

- [18] D. König, H.-J. Straube:  
Prüfung des Alterungsverhaltens von Hochspannungs-Isolierungen unter Feuchtigkeitseinwirkung  
Calor-Emag Mitteilungen 1975, Heft 1, S. 16...27
- [19] IEC 60815:  
Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions  
Edition 1.0b, 1986-05
- [20] IEC 60507:  
Artificial pollution test on high voltage insulators to be used on a.c. systems  
Edition 2.0b, 1991-04
- [21] IEC/TR0 60932, bzw. IEC Report 932:  
Additional requirements for enclosed switchgear and controlgear from 1 kV to 72.5 kV to be used in severe climatic conditions  
Edition 1, 1988-01
- [22] D. König, P. Rösch, B. Müller:  
Contribution on the Specification of an Ageing Test for the Insulation of Enclosed, Air-Insulated Switchgear  
IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 22, No. 6,  
December 1987, S. 769...774
- [23] D. König, B. Müller:  
Surface Processes on the Insulation of Compact Medium-Voltage Switchgear under Aggravated Indoor-Service Conditions  
International Conference on Electricity Distribution (CIRED), 1983,  
S. e.09.1...e.09.7
- [24] H.-J. Klös, D. König:  
Experience with Ageing and Humidity Tests according to IEC Report 932  
1995 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Virginia Beach, USA, 1995, S. 282...285
- [25] G. Drescher, H. Späck:  
Alterungsprüfungen für Mittelspannungsschaltanlagen für erschwerte Umgebungsbedingungen nach IEC Report-932  
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 95, Heft 17/18, 1996, S. 1171...1176
- [26] S. Keim, D. König, M. Eiselt, M. Kluge :  
Standardized and Non-Standardized Ageing Tests for Indoor Switchgear and Switchgear Components under Severe Climatic Conditions  
2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), Boston, MA, USA, 2002, S. 331...335



- [27] S. Keim, D. König, M. Kluge, M. Eiselt:  
Alterungsprüfungen nach IEC Report 932 zur Diagnostik von  
Komponenten luftisolierter Mittelspannungsschaltanlagen bei Einsatz  
unter erschwerten Umgebungsbedingungen  
ETG-Fachbericht 87, Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, VDE Verlag,  
Berlin, Offenbach, 2002, S. 33...37
- [28] D. König, Y. N. Rao:  
Teilentladungen in Betriebsmitteln der Energietechnik  
VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 1993
- [29] IEC 60298:  
A.C. metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above  
1 kV and up to and including 52 kV  
Edition 3, 1990-12
- [30] IEC 60466:  
A.C. insulation-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages  
above 1 kV and up to and including 38 kV  
Edition 2, 1987-01
- [31] DIN 50035, Teil 1:  
Begriffe auf dem Gebiet der Alterung, Grundbegriffe  
1989-03
- [32] F. Obenaus:  
Der Einfluß von Oberflächenbelag auf die Überschlagsspannung von  
Isolatoren  
Mitteilungen der Hermdorf-Schomburg Isolatoren GmbH, Heft 70, 1933,  
S. 2203...2239
- [33] H. v. Cron:  
Der Fremdschichtüberschlag  
Siemens Zeitschrift, Jg. 29, Heft 10, 1955, S. 427...483
- [34] T. Tanaka, T. Okamoto, K. Nakanishi, T. Miyamoto:  
Ageing and Related Phenomena in Electric Power Systems  
IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28, No. 5, October 1993,  
S. 826...844
- [35] B. Müller:  
Untersuchungen zum Oberflächenverhalten von stabförmigen Isolatoren  
aus Epoxidharz-Formstoff bei simultaner Beanspruchung durch Feuchte  
und hohe Wechselspannung  
Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1985

- [36] O. Elsässer:  
Einfluß von Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf das Überschlagsverhalten  
von Mittelspannungsisolatoren  
Dissertation, Universität Stuttgart, Shaker Verlag, 2002
- [37] R. Bärsch, H. Gremmel, D. König, J. Pilling:  
Veränderung des Isoliervermögens an Feststoff/Gas-Grenzflächen durch  
fremdschicht initiierte Teilentladungen  
ETG-Fachbericht 49, Isolationskoordination in Hoch- und  
Mittelspannungsanlagen, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 1993,  
S. 133...149
- [38] G. Taylor:  
Disintegration of Water in an Electrical Field  
Proc. Roy. Soc., Vol. A 280, London, 1964, S. 383...397
- [39] W. A. Macky:  
Some Investigations on the Performance and Breaking of Water Drops in  
Strong Electric Fields  
Proc. Roy. Soc., Vol. A 133, London, 1931, S. 565...587
- [40] J. D. Sherwood:  
Breakup of Fluid Droplets in Electric and Magnetic Fields  
Journal of Fluid Mechanisms, Vol. 188, 1988, S. 133...146
- [41] P. R. Bazier-Smith, S. G. Jennings, J. Latham:  
An Investigation of the Behaviour of Drops and Drop-Pairs Subjected to  
Strong Electrical Forces  
Proc. Roy. Soc., Vol. A 325, London, 1971, S. 363...376
- [42] F. R. S. Lord Rayleigh:  
On the Equilibrium of Liquid Conducting Masses Charged with Electricity  
Phil. Mag. 14, 1882, S. 184...186
- [43] D. Windmar:  
Water Drop Initiated Discharges in Air  
Dissertation Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala, Sweden, 1994
- [44] STRI AB:  
Hydrophobicity Classification Guide  
Volume 92/1 of Swedish Transmission Research Institute Guide, STRI AB,  
Ludvika, Schweden, 1992
- [45] T.-C. Cheng:  
Mechanisms of Flashover of Contaminated Insulators  
Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA, USA,  
1974

- [46] T.-C. Cheng, D. C. Jolly, D. J. King:  
Surface Flashover of Water Repellent Insulators under Moist Conditions  
IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 12, No. 3, June 1977,  
S. 208...213
- [47] T. Schütte, S. Hörnfeldt:  
Dynamics of Electrically Stressed Water Drops on Insulating Surfaces  
1990 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI),  
Toronto, Canada, 1990, S. 201...207
- [48] T. Schütte:  
Water Drop Dynamics and Flashover Mechanisms on Hydrophobic  
Surfaces  
Nordic Insulation Symposium (NORD-IS 90), Lyngby, Denmark, 1990,  
S. 8.1.1 ...8.1.14
- [49] P. R. Bazier-Smith:  
Stability and Shape of Isolated and Pairs of Water Drops in an Electric  
Field  
The Physics of Fluids, Vol. 14, No. 1, January 1971, S. 1...6
- [50] P. Rösch, D. König:  
Funktionelles Verhalten von belasteten Isolierstoffoberflächen bei  
simultaner Beanspruchung durch hohe elektrische Feldstärke,  
Klimaeinflüsse und Verschmutzung unterschiedlicher Art  
Abschlußbericht des Sonderforschungsbereiches „Oberflächentechnik“  
zum Teilprojekt D4 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG),  
Technische Hochschule Darmstadt, 1988
- [51] I. Quint:  
Untersuchungen zum Einfluß von schwach leitenden Fremdschichten auf  
das Oberflächen-Alterungsverhalten wechsellastungsbelasteter  
zylindrischer Prüflinge aus Epoxidharz-Formstoff  
Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1993
- [52] D. König, I. Quint, P. Rösch, B. Bayer:  
Surface Discharges on Contaminated Epoxy Insulators  
IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 24, No. 2, April 1989,  
S. 229...237
- [53] M. Berg:  
Estimation of Hydrophobicity of Insulating Surfaces by Studying Sessile  
Drops,  
Dissertation, Faculty of Science and Technology, No. 33, Uppsala,  
Sweden, 2001

- [54] T. Tokoro, M. Nagao, M. Koskai:  
Image Analysis of Hydrophobicity of Polymer Insulators by Observing at Microscopic Area  
2000 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Victoria, BC, Canada, 2000, S. 226...229
- [55] T. Tokoro, Y. Omoto, M. Kosaki:  
Image analysis of hydrophobicity of polymer insulators using PVM  
2001 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Kitchener, Ontario, Canada, 2001, S. 581...584
- [56] Y. Mizuno, M. Iwatani, M. Nagata, K. Naito, K. Kondo, S. Ito:  
Behavior of Water Droplets on Silicone Rubber Sheet under AC Voltage Application  
1998 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Atlanta, Georgia, USA, 1998, S. 96...99
- [57] I. J. S. Lopes, S. H. Jayaram, E. A. Cherney:  
A Study of Surface Discharges from Water Droplets on Silicone Rubber Insulators  
2000 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Victoria, BC, Canada, 2000, S. 199...202
- [58] H.-J. Klös, D. König, W.-K. Park:  
Untersuchungen zum Einfluß der verwendeten Harz/Härter/Füllstoff-Komponenten auf die Oberflächenalterung von Gießharz-Formstoffen bei Belastung mit feuchter Fremdschicht und hoher elektrischer Feldstärke  
Elektrie, 50, Heft 12, 1996, S. 457...467
- [59] H. Jahn, R. Bärsch:  
On the Influence of Different Stress Factors on the Hydrophobicity and the Electrical Behaviour of Silicone Rubber Surfaces  
International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials (APTADM), 2001, Wroclaw, Poland, S. 363...366
- [60] N. Dhahbi-Megriche, A. Beroual:  
Flashover Dynamic Model of Polluted Insulators under AC Voltage  
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 2, April 2000, S. 283...289
- [61] A. González, A. Castellanos:  
Nonlinear dynamics of a Falling Vertical Film Subjected to a Normal Electrical Field  
1997 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, (CEIDP), Minneapolis, USA, 1997, S. 714...717

- [62] A. Castellanos, A. González:  
Nonlinear Electrohydrodynamics of Free Surfaces  
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 3,  
June 1998, S. 334...343
- [63] A. González, A. Castellanos:  
Global energy analysis for the problem of a liquid film flowing down an  
inclined plane subjected to an electrical field  
2000 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena  
(CEIDP), Victoria, BC, Canada, 2000, S. 304...307
- [64] A. González, A. Castellanos:  
The Effect of a Finite Conductivity on the Stability of a Falling Liquid  
Film Subjected to a Normal Electric Field  
2001 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena  
(CEIDP), Kitchener, Ontario, Canada, 2001, S. 524...527
- [65] P. Basappa, V. Lakdawala, G. Gerdin:  
Computation of the Electric Field around a Wet Polluted Insulator by  
Analytic and Numerical Techniques  
2001 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena  
(CEIDP), Kitchener, Ontario, Canada, 2001, S. 564...567
- [66] H. Singer:  
Feldberechnung mit Oberflächenleitschichten und Volumenleitfähigkeiten  
der Isolation  
etzArchiv, 3 (8), 1981, S. 265...267
- [67] A. Ahmed, H. Singer, P. K. Mukherjee:  
A Numerical Model Using Surface Charges for the Calculation of Electric  
Fields and Leakage Currents on Polluted Insulator Surfaces  
1998 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena,  
(CEIDP), Atlanta, Georgia, USA, 1998, S. 116...119
- [68] A. Ahmed, H. Singer:  
Effect of Thermal Capacities of Ceramic Insulators on their Electrical and  
Thermal Analysis under Contaminated Surface Conditions  
2000 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena  
(CEIDP), Victoria, BC, Canada, 2000, S. 238...241
- [69] H. El-Kishky, R. S. Gorur:  
Electric Potential and Field Computation along ac HV Insulators  
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No. 6,  
December 1994, S. 982...990

- [70] H. El-Kishky, R. S. Gorur:  
Electric Field Computation on an Insulating Surface with Discrete Water Droplets  
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, No. 3, June 1996, S. 450...456
- [71] H. El-Kishky, R. S. Gorur:  
Electric Field and Energy Computation on Wet Insulating Surfaces  
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, No. 4, August 1996, S. 587...593
- [72] U. van Rienen, M. Clemens, T. Weiland:  
Simulation of Low-Frequency Fields on High-Tension Insulators with Light Contaminations  
Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG), July 1995
- [73] M. Clemens, R. Schuhmann, U. van Rienen, T. Weiland:  
Modern Krylov Subspace Methods in Electromagnetic Field Computation Using the Finite Integration Theory  
ACES Journal Special Issue on Applied Mathematics: „Meeting the Challenges Presented by Computational Electromagnetics“, Vol. 11, No. 1, 1996, S. 70...84
- [74] U. van Rienen, M. Clemens, T. Weiland:  
Computation of Low-frequency Electromagnetic Fields  
ZAMM (Z. angew. Math. Mech.), Vol. 76, 1996, S. 567...568
- [75] U. van Rienen, M. Clemens, T. Weiland:  
Simulation of Low-Frequency Fields on High-Voltage Insulators with Light Contaminations  
IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 3, 1996, S. 816...819
- [76] M. Clemens, U. van Rienen, T. Weiland:  
Comparison of Krylov-Type Methods for Complex Linear Systems Applied to High-Voltage Problems  
IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 5, 1998, S. 3335...3338
- [77] M. Clemens, P. Thoma, T. Weiland, U. van Rienen:  
A Survey on the Computational Electromagnetic Field Calculation with the FI-Method  
Surveys on Mathematics for Industry, Vol. 8, No. 3-4, 1999, S. 213...232
- [78] U. van Rienen:  
Numerical Methods in Computational Electrodynamics – Linear Systems in Practical Applications  
Lecture Notes in Computational Science and Engineering (LNCSE) 12, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2001, S. 224...233

- [79] W. K. Park:  
Untersuchungen zum Einfluß der Systemkomponenten typisierter, gefüllter Gießharz-Formstoffe auf das Oberflächenverhalten von Modellisolatoren bei verschiedenen elektrischen Langzeit- und Kurzzeitprüfungen  
Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1994
- [80] O. Claus:  
Charakterisierung des Oberflächenzustandes zylindrischer Prüfkörper aus Epoxidharz-Formstoff vor und nach der Beanspruchung mit wässrigen salzhaltigen Fremdschichten und 50 Hz-Wechselspannung  
Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1996
- [81] H.-J. Klös:  
Über Prüfverfahren zur Beurteilung der Frühphase der Oberflächenalterung von Harzformstoffen bei simultaner Beanspruchung durch hohe elektrische Feldstärken und feuchte Fremdschichten  
Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1998
- [82] A. Baumgartner, H.-J. Liebscher:  
Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie,  
Lehrbuch der Hydrologie, Band 1  
2. Auflage, Gebrüder Bornträger Verlag, Berlin, Stuttgart, 1996
- [83] G. Mattheß:  
Die Beschaffenheit des Grundwassers  
Lehrbuch der Hydrologie, Band 2  
3. Auflage, Gebrüder Bornträger Verlag, Berlin, Stuttgart, 1994
- [84] W. J. Moore:  
Grundlagen der Physikalischen Chemie,  
Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York, 1990
- [85] Hrsg.: J. Falbe, M. Regnitz:  
Römpch Chemie Lexikon  
Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York  
9. Auflage, 1995, Band 1...6
- [86] N. N. Greenwood, A. Earnshaw:  
Chemie der Elemente  
VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1990
- [87] M. Klose, J. I. Naberuchin:  
Wasser - Struktur und Dynamik  
Akademie-Verlag, Berlin, 1986

- [88] K.-H. Bock, R. Brauner, F.-U. Dentler, H. Erdmann, J. Günther, A. Kresling, W. Seifert:  
Seewetter  
1. Auflage, DSV-Verlag GmbH, Hamburg, 1999
- [89] M. I. L'Vocic:  
World Water Balance – General Report  
Symposium on World Water Balance, IASH (2) 93, 1970, S. 410...405
- [90] V. I. Korzun:  
World Water Balance and Water Resources of the Earth  
Studies and Reports in Hydrology 75, Paris, 1978
- [91] R. L. Nance:  
The Present State and Future Prospects of Global Hydrology  
World Water Balance, Proc. Reading Symposium, IAHS, Gentbrügge, July 1970
- [92] A. Baumgartner, E. Reichel:  
Die Weltwasserbilanz  
Oldenbourg Verlag, München, 1975
- [93] S. N. Davis, R. J. M. de Wiest:  
Hydrogeology  
2. Auflage, New York, London, Sydney, Wiley-Verlag, 1967
- [94] F. Wagner:  
Vergleich der Konzentrationsänderungen der Chlorid-, Nitrat-, Sulfat-, Natrium-, Ammonium-, Zink-, Cadmium-, Blei- und Kupferionen im Regenwasser von Jülich/Stolberg  
Berichte der Kernforschungsanlage Jülich Nr. 2290, 1989
- [95] J. Markinek, E. Rosenkranz:  
Das Wasser der Erde  
1. Auflage, Verlag Harri Deutsch, 1989
- [96] N. E. Frost, G. Xu, P. B. McGrath:  
An Examination of the Environments for Aging of Polymers  
1997 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Minneapolis, USA, 1997, S. 354...357
- [97] M. J. Schwuger:  
Lehrbuch der Grenzflächenchemie  
Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 1996



- [98] W. A. Zisman:  
Surface Energetics of Wetting, Spreading and Adhesion  
Journal of Paint Technology, Vol. 44, No. 564, January 1972, S. 42...57
- [99] K. L. Wolf:  
Physik und Chemie der Grenzflächen - Die Phänomene im Allgemeinen  
Erster Band, Springer Verlag, 1957
- [100] Draft IEC 62073:  
Guide to the measurement of wettability of insulator surface  
Committee Draft, Edition 1.0, 2000-01
- [101] Internet: [www.botanik.uni-bonn.de](http://www.botanik.uni-bonn.de)
- [102] G. T. Dambacher:  
Der Lotus-Effect – heute und morgen  
in KU Kunststoffe, Jahrgang 92, 6, 2002, S. 65...66
- [103] Europäisches Patent EP 0 772 514 B1:  
Selbstreinigende Oberflächen von Gegenständen sowie Verfahren zur  
Herstellung derselben  
Erfinder: W. Barthlott  
Priorität: 29.07.1994 des Deutschen Patents DE 4 426 962  
Anmeldetag: 25.07.1995  
Veröffentlichungstag: 23.12.1998
- [104] D. König:  
Erfassung von Teilentladungen in Hohlräumen von Epoxidharzplatten zur  
Beurteilung des Alterungsverhaltens bei Wechselspannung  
Dissertation, TH Braunschweig, 1967
- [105] S. Keim, D. König:  
Recent Studies about Single Droplets on Insulating Surfaces with an  
Applied Electrical Field  
International Conference on Advances in Processing, Testing and  
Application of Dielectric Materials (APTADM), 2001, Wroclaw, Poland,  
S. 92...95
- [106] T. Schütte:  
Water Drop Dynamics and Flashover Mechanisms on Hydrophobic  
Surfaces  
Nordic Insulation Symposium (NORD-IS 92), Västeras, Schweden,  
June 1992, Paper 8.1, S. 8.1:1 ...8.1:14
- [107] J. A. Robertsson:  
Interactions between a Highly Charged Aerosol Droplet and the  
Surrounding Gas  
Ph. D. Thesis University of Illinois, USA, 1969

- [108] H.-J. Klös, D. König:  
Basic Investigations of the Performance of Droplets on Electrically Stressed Polymer Surfaces  
1997 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Minneapolis, USA, 1997, S. 374...377
- [109] S. Keim, D. König:  
The Performance of Electrically Stressed Droplets on Insulating Surfaces Observed with an Optical Measuring System  
2000 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Victoria, BC, Canada, 2000, S. 792...795
- [110] S. Keim, D. König:  
The Dynamic Behaviour of Water Drops in an AC Field  
2001 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Kitchener, Ontario, Canada, 2001, S. 613...616
- [111] J. Eggers:  
Tropfenbildung,  
Phys. Bl. 53, Nr. 5, 1997, S. 431...434
- [112] S. Keim, D. König:  
Study of the Behavior of Droplets on Polymeric Surfaces under the Influence of an Applied Electrical Field  
1999 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, (CEIDP), Austin, Texas, USA, 1999, S. 702...710
- [113] S. Keim, D. König:  
Das Verhalten von Tropfen auf polymeren Isolierstoffoberflächen bei Beanspruchung mit Wechselspannung  
ETG-Fachbericht 76, Einfluß von Grenzflächen auf die Lebensdauer elektrischer Isolierungen – Grundlagen, Diagnostik, Betriebserfahrungen, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 1999, S. 123...128
- [114] S. Keim, D. König:  
Optische Diagnostik an tropfenförmigen Fremdschichten auf polymeren Isolierstoffoberflächen im elektrischen Feld  
ETG-Fachbericht 87, Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 2002, S. 149...152
- [115] T. Weiland:  
Eine Methode zur Lösung der Maxwellschen Gleichungen für sechskomponentige Felder auf diskreter Basis  
AEÜ Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik 31, 1977, S. 116...120

- [116] U. Schreiber, U. van Rienen:  
Simulation of the Behavior of Droplets on Polymeric Surfaces under the Influence of an Applied Electrical Field  
Ninth Biennial IEEE Conference, CEFC 2000, Milwaukee, USA, 2000, S. 474...475
- [117] U. Schreiber, S. Keim, U. van Rienen:  
Simulation of Electric Field Strength and Force Density on Contaminated HV-Insulators  
Scientific Computing in Electrical Engineering (U. van Rienen, M. Günther, D. Hecht, eds.), Lecture Notes in Computational Science and Engineering (LNCSE) 18, Springer-Verlag, Berlin, 2001, S. 79...86
- [118] U. Schreiber, U. van Rienen:  
Simulation of Droplet Shapes under the Influence of an Applied High-Voltage A.C. Field  
13th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG), Evian, 2001, S. II-168...II-169
- [119] U. Schreiber, U. van Rienen:  
Simulation von Wassertropfen aus Isolierstoffoberflächen bei Beanspruchung mit Wechselspannung  
Tagungsband des 10. Symposium Maritime Elektrotechnik, Arbeitskreis Mess- und Informationstechnik, Rostock, 2001, S. 59...62
- [120] H. W. Müller:  
Periodic Triangular Patterns in the Faraday Experiment  
Phys. Rev. Lett., 71, 3287, 1993
- [121] A. Engel, A. Lange, H. Langer, T. Mahr, M.V. Cheteverikov:  
A Single Peak of the Rosensweig Instability  
Journal of Magnetism and Magnetic Materials 201, 1999, S. 310...312
- [122] A. Lange, H. Langer, A. Engel:  
Dynamics of a Single Peak of the Rosensweig Instability in a Magnetic Field  
Physica D 140, 2000, S. 294...305
- [123] IEC 61302:  
Electrical insulating materials – Method to evaluate the resistance to tracking and erosion – Rotating wheel dip test  
Edition 1, 1995-04
- [124] IEC 60112:  
Method for determining the comparative and the proof tracking indices of solid insulating materials under moist conditions  
Edition 3.0, 1979-01

- [125] IEC 60587:  
Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion of electrical insulating materials used under severe ambient conditions  
Edition 2, 1984-01
- [126] ASTM D 2303:  
Standard Test Methods for Liquid-Contaminant, Inclined Plane Tracking and Erosion of Insulating Materials  
Designation D 2303-97
- [127] IEC 61109:  
Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria  
Edition 1.0b, 1992-03
- [128] IEC 60093:  
Methods of test for volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials  
Edition 2.0b, 1980-01
- [129] IEC 60250:  
Recommended methods for the determination of the permittivity and dielectric dissipation factor of electrical insulating materials at power, audio and radio frequencies including metre wavelengths  
Edition 1.0b, 1969-01
- [130] IEC 60243-1:  
Electrical strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies  
Edition 2.0, 1998-01
- [131] DIN 53504:  
Prüfung von Kautschuk und Elastomeren; Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch  
Ausgabe 1994-05
- [132] DIN 53505:  
Prüfung von Kautschuk und Elastomeren – Härte Prüfung nach Shore A und Shore D  
Ausgabe 2000-08
- [133] IEC 60707:  
Flammability of solid non-metallic materials when exposed to flame sources – List of test methods  
Edition 2, 1999-03

- [134] IEC 60137:  
Insulating bushings for alternating voltages above 1000 V  
Edition 4.0b, 1995-12
- [135] IEC 60068-3-6:  
Environmental testing - Part 3-6: Supporting documentation and guidance  
- Confirmation of the performance of temperature/humidity chambers  
Edition 1.0b, 2001-08
- [136] IEC 60068-3-7:  
Environmental testing - Part 3-7: Supporting documentation and guidance  
- Measurements in temperature chambers for tests A and B (with load)  
Edition 1.0b, 2001-08
- [137] IEC 60694:  
Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear  
standards  
Edition 2.2b, 2002-01
- [138] IEC 60517:  
Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages of 72.5 kV and  
above  
Edition 3.0, 1990-10
- [139] IEC 60076-3:  
Power transformers - Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external  
clearances in air  
Edition 2.0b, 2000-03
- [140] IEC 60044-1:  
Instrument transformers - Part 1: Current transformers  
Edition 1.0b, 1996-12
- [141] IEC 60044-2:  
Instrument transformers - Part 2 : Inductive voltage transformers  
Edition 1.1b, 2000-11
- [142] IEC 60099-4:  
Surge arresters – Part 4: Metal oxide surge arresters without gaps for A. C.  
systems  
Edition 1.2, 2001-12
- [143] D. König, B. Müller:  
Condensation as a Surface-Phenomenon on Insulation-Surfaces of  
Medium-Voltage Indoor Switchgear  
1st International Symposium on Pollution Performance of Insulators and  
Surge Diverters (ISPPISD), Madras, India, 1981, S. 1.08.01...1.08.06

- [144] D. König, B. Müller:  
Surface Processes on the Insulation of Compact Medium Voltage  
Switchgear under Aggravated Service Conditions  
2nd International Symposium on Pollution Performance of Insulators and  
Surge Diverters (ISPPISD), Madras, India, 1983, Paper 1.04
- [145] D. König, P. Rösch:  
Surface Discharges on Epoxy Resin Model Post Insulators Initiated by  
Moisture Layers with Low Layer Conductivity  
1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI),  
Boston, MA, USA, 1988, S. 54...59
- [146] D. König, K.-H. Krefter, H. Gremmel, H.-J. Straube:  
Environmental Humidity Conditions for enclosed High-Voltage  
Switchgear New Test Procedures, Definitions and Service Experience  
10th International Conference on Electricity Distribution (CIRED),  
Brighton, UK, 1989, S. 47...51
- [147] D. König, I. Quint:  
Recent Investigations on the Ageing Performance of Wet Epoxy Resin Post  
Insulators Stressed by Surface Partial Discharges  
6th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH),  
New Orleans, LA, USA, 1989, Paper 47.12
- [148] D. König, I. Quint, Y. N. Rao:  
Investigations on the Very Early Stage of Surface Aging of Lightly  
Contaminated Epoxy Resin Post Insulators  
7th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH),  
Dresden, Germany, 1991, Paper 24.02, S. 269...272
- [149] D. König, I. Quint:  
Diagnosegrößen zur Beurteilung von polymeren Isolierstoff-Oberflächen  
bei Belastung mit elektrischer Feldstärke und Fremdschichten geringer  
Leitfähigkeit  
ETG-Fachbericht 40, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 1992, S. 75...81
- [150] D. König:  
Surface and Ageing Phenomena on Organic Insulation under the Condition  
of Light Contamination and High Electric Stress  
Nordic Insulation Symposium (Nord-IS 94), Vaasa, Finland, 1994,  
Paper 0.1, S. 17...35
- [151] H.-J. Klös, U. Kaltenborn, W.-K. Park, D. König:  
The Performance of Model Switchgear, Real Switchgear Panels and  
Dry-Type Power Transformers under Humidity Tests according to  
IEC Report 932  
9th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Graz,  
Austria, 1995, S. 3916-1...3916-4

- [152] U. Kaltenborn, J. Kindersberger, R. Bärsch, H. Jahn:  
Electrical Performance of Different Insulating Materials in a Rotating-  
Wheel-Dip-Test  
1997 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena  
(CEIDP), Minneapolis, USA, 1997, Paper 5A-10
  
- [153] S. M. Gubanski:  
Experience with the Merry-go-round Test  
IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 25, No. 2, April 1990,  
S. 331...340
  
- [154] W. T. Starr:  
Polymeric Outdoor Insulation  
IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 25, No. 1, February 1990,  
S. 125...136
  
- [155] K. Wieczorek, T. Gustavsson:  
Results of Investigation of Silicone Rubbers by Rotating Wheel Dip Test  
Method  
International Conference on Advances in Processing, Testing and  
Application of Dielectric Materials (APTADM), 2001, Wroclaw, Poland,  
S. 328...331

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Merkmale der verschiedenen Schaltanlagentypen in der Mittelspannungstechnik .....	10
Tabelle 2.2:	Kategorien für Betauung und Fremdschichten .....	11
Tabelle 2.3:	Definition der Schwierigkeitsgrade .....	12
Tabelle 2.4:	Definition der Bemessungsklassen .....	12
Tabelle 4.1:	Charakteristische Kennwerte von H <sub>2</sub> O .....	39
Tabelle 4.2:	Verdunstungszahlen für verschiedene Flüssigkeiten .....	46
Tabelle 4.3:	Wassermengen der Erde .....	48
Tabelle 4.4:	Mittlere Verweilzeiten des Wassers .....	48
Tabelle 4.5:	Klassifikation von Wasser .....	49
Tabelle 4.6:	Gelöste Salze im Meerwasser .....	51
Tabelle 4.7:	Meerwasser mit einem Salzgehalt von 35 ‰ .....	51
Tabelle 4.8:	Spezifische elektrische Leitfähigkeiten des Wassers .....	52
Tabelle 4.9:	Fallender Niederschlag .....	53
Tabelle 4.10:	Abgesetzter Niederschlag .....	54
Tabelle 4.11:	Abhängigkeit der Fallgeschwindigkeit vom Durchmesser der Regentropfen .....	55
Tabelle 4.12:	Größe von Regentropfen auf der Erdoberfläche .....	55
Tabelle 4.13:	Natrium- und Chlorgehalt des Regenwassers in Abhängigkeit von der Entfernung zum Meer .....	57
Tabelle 4.14:	Kriterien zur Klassifizierung der Hydrophobie .....	66
Tabelle 5.1:	Übersicht typischer Diagnoseverfahren für feste Isolierstoffoberflächen .....	74
Tabelle 6.1:	Einflußparameter bei singulären Tropfen auf Isolierstoffoberflächen .....	86
Tabelle 6.2:	Untersuchte Parameter .....	88
Tabelle 6.3:	Eigenschaften der untersuchten Epoxidharz-Formstoffsysteme .....	92
Tabelle 6.4:	Parameter zur Untersuchung der Oberflächenwellen- Einsetzspannung an einem singulären Tropfen .....	110
Tabelle 6.5:	Parameter zur Untersuchung der Oberflächenwellen- Einsetzspannung an mehreren singulären Tropfen .....	111
Tabelle 6.6:	Kategorien zur Beschreibung des Verhaltens eines Tripelpunktes ..	117
Tabelle 6.7:	Kategorien zur Beschreibung des Verhaltens eines Randwinkels ...	118
Tabelle 6.8:	Kategorien zur Beschreibung der Tropfenhöhe .....	119
Tabelle 6.9:	Kategorien zur Definition des Tropfenverhaltens .....	120
Tabelle 6.10:	Beschreibung des Tropfenverhaltens anhand von Beispielen .....	121
Tabelle A.1:	Beispiele für Bewertungen von festen Isolierwerkstoffen .....	188
Tabelle A.2:	Beispiele für Bewertungen von Komponenten .....	189
Tabelle A.3:	Beispiele für Bewertungen von Betriebsmitteln .....	189
Tabelle A.4:	Prüfeinrichtungen zur Alterung von Isolierstoffsystemen am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt .....	191



## Bildverzeichnis

Bild 2.1:	Klimabereiche bei installierten Innenraumanlagen .....	7
Bild 2.2:	Möglichkeiten zur Klassifizierung einer Innenraumschaltanlage .....	13
Bild 2.3:	Alterungsmodell zur Beschreibung der Alterungsfrühphase .....	17
Bild 2.4:	Tropfenverformungen bei einem konstantem hohen Gleichfeld parallel zur Oberfläche .....	22
Bild 2.5:	Elektrisches Ersatzschaltbild für einen Tropfen auf einer Isolierstoffoberfläche .....	24
Bild 3.1:	Überblick zur Einordnung der hier behandelten Fragestellung .....	35
Bild 4.1:	Molekulare Struktur von Wasserstoff, Sauerstoff und eines Wassermoleküls .....	38
Bild 4.2:	Aggregatzustände und Phasenübergänge von Wasser .....	40
Bild 4.3:	Zustandsänderungen von Wasser .....	41
Bild 4.4:	Momentaufnahme der Molekulanordnung von flüssigem Wasser .....	43
Bild 4.5:	Maximale Wasserdampfmenge in Abhängigkeit der Temperatur .....	44
Bild 4.6:	Dampfdruck, relative Luftfeuchte und Lufttemperatur .....	44
Bild 4.7:	Schema des Wasserkreislaufes .....	47
Bild 4.8:	Ein Flüssigkeitstropfen auf einer Feststoffoberfläche .....	58
Bild 4.9:	Ein Flüssigkeitstropfen auf einer Feststoffoberfläche .....	60
Bild 4.10:	Hydrophobieigenschaften .....	63
Bild 4.11:	Definition der Hydrophobieklassen .....	65
Bild 4.12:	Mikroporöse Oberflächenstruktur eines Blatts der Lotusblume .....	67
Bild 4.13:	Tropfen auf einer Oberfläche mit Lotuseffekt .....	68
Bild 4.14:	Schmutzpartikel auf einer Oberfläche mit Lotuseffekt und Schmutzpartikel auf einer glatten hydrophoben Oberfläche .....	69
Bild 5.1:	Gesamtbild des Versuchsaufbaus zur Diagnose singulärer Tropfen .....	76
Bild 5.2:	Randwinkel-Meßsystem .....	77
Bild 5.3:	Hochgeschwindigkeitskamera .....	80
Bild 5.4:	Erzeugung einer reproduzierbaren Wechselfspannung mit einem Funktionsgenerator .....	83
Bild 5.5:	Schaltbild der Spannungserzeugung und Messung .....	83
Bild 6.1:	Geometrie des Prüfkörpers und Definition eines Koordinatensystems auf der Isolierstoffoberfläche .....	91
Bild 6.2:	Dynamisches Verhalten des Systems der Spannungserzeugung bei einem Ein- und Ausschaltvorgang der Hochspannung .....	95
Bild 6.3:	Zeitabhängigkeit der Randwinkel bei einem Verdunstungsvorgang .....	97
Bild 6.4:	Oberflächenstrukturen bei einem unbeanspruchten und bei einem spannungsbeanspruchten Tropfen .....	98
Bild 6.5:	Zeitliche Bewegung der Tripelpunkte in Abhängigkeit des Materials .....	104
Bild 6.6:	Oberflächenwellen-Einsetzspannung für drei Epoxidharz- Formstoffsysteme in Abhängigkeit des Tropfenvolumens .....	112

Bild 6.7:	Oberflächenwellen-Einsetzspannung in Abhängigkeit der Tropfenanzahl .....	113
Bild 6.8:	Definition der geometrischen Größen zur Beschreibung des Tropfenverhaltens .....	114
Bild 6.9:	Definition des Äquatorialdurchmessers und des Tropfendurchmessers .....	115
Bild 7.1:	Zylindrischer Modellprüfkörper mit singulären Tropfen .....	127
Bild 7.2:	Elektrisches Fremdfeld ohne Tropfen – $E_x$ -Komponente auf der Prüfkörperoberfläche .....	128
Bild 7.3:	Zwei singuläre Tropfen verändern das äußere Fremdfeld – $E_x$ -Komponente auf der Prüfkörperoberfläche .....	129
Bild 8.1:	Erweitertes Alterungsmodell zur Modellierung der Alterungsfrühphase fester polymerer Isolierstoffe .....	137
Bild A.1:	Zeitliche Abfolge möglicher Prüfungen im Labor .....	188
Bild A.2:	Prüfgefäß der Inversen Klimakammer mit eingebautem zylinderförmigen hohlgebohrtem Isolierprüfkörper .....	192
Bild A.3:	Kaltnebelkammer .....	194
Bild A.4:	Klimakammer .....	197
Bild A.5:	Prüfraum der Klimakammer mit installiertem Prüfobjekt .....	197
Bild A.6:	Modifizierter Radtest .....	198
Bild A.7:	Plattenförmiger Prüfkörper mit montierten Elektroden zur Prüfung der Kriechstromfestigkeit .....	201
Bild A.8:	Plattenförmige Prüfkörper mit Entladungserscheinungen während einer Prüfung der Kriechstromfestigkeit .....	201

## Verzeichnis der Bildsequenzen

Bildsequenz 1:	Verdunstungsvorgang eines Wassertropfens ohne elektrisches Feld .....	144
Bildsequenz 2:	Oberflächenstrukturen innerhalb einer halben Spannungsperiode .....	145
Bildsequenz 3:	Oberflächenstrukturen in aufeinander folgenden Spannungsperioden .....	146
Bildsequenz 4:	Oberflächenstrukturen bei einem unsymmetrischen Tropfenverhalten .....	147
Bildsequenz 5:	Gleichmäßige Oberflächenstrukturen bei zwei Tropfen .....	148
Bildsequenz 6:	Änderung des rechten und linken Randwinkels innerhalb einer halben Spannungsperiode.....	149
Bildsequenz 7:	Auftreffen eines Tropfens auf einen spannungsfreien Prüfkörper nach einem freien Fall aus etwa 0,5 m Höhe .....	150
Bildsequenz 8:	Auftreffen eines Tropfens auf einen spannungsfreien Prüfkörper nach einem freien Fall aus etwa 0,5 m Höhe .....	151
Bildsequenz 9:	Prüfkörper mit Lotusbeschichtung .....	152
Bildsequenz 10:	Abrollvorgang eines Tropfens auf einer schiefen Ebene mit einem Neigungswinkel von 32° gegen die Horizontale.....	153
Bildsequenz 11:	Bildung von Flüssigkeitsspuren zwischen zwei Tropfen .....	154
Bildsequenz 12:	Bildung eines Satellitentropfens.....	155
Bildsequenz 13:	Zusammenfließen von zwei Tropfen.....	156
Bildsequenz 14:	Zusammenfließen von drei Tropfen .....	157

## Symbole und Abkürzungen

Symbol	Einheiten	Bezeichnung
$\alpha$	[°]	Winkel
$\gamma$	[kg/s <sup>2</sup> = N/m]	Oberflächenspannung
$\gamma_L$	[kg/s <sup>2</sup> = N/m]	Oberflächenspannung der Flüssigkeit
$\gamma_S$	[kg/s <sup>2</sup> = N/m]	Oberflächenspannung des Feststoffes
$\gamma_{SL}$	[kg/s <sup>2</sup> = N/m]	Grenzflächenspannung Feststoff-Flüssigkeit
$\epsilon_0$	[A <sup>2</sup> ·s <sup>4</sup> /(kg·m <sup>3</sup> ) = A·s/(V·m)]	Dielektrizitätskonstante
$\epsilon_r$	[1]	relative Dielektrizitätskonstante
$\vartheta$	[K bzw. °C]	Temperatur
$\Theta$	[°]	Randwinkel
$\Theta_L$	[°]	linker Randwinkel
$\Theta_R$	[°]	rechter Randwinkel
$\Theta_{\text{rück}}$	[°]	Rückzugsrandwinkel
$\Theta_{\text{vor}}$	[°]	Vorrückrandwinkel
$\kappa$	[(A <sup>2</sup> ·s <sup>3</sup> )/((kg·m <sup>3</sup> )) = 1/(Ω·m) = S/m]	Volumenleitfähigkeit
$\mu$	[A <sup>2</sup> ·s <sup>3</sup> /(kg·m) = S·m]	Dipolmoment aus Polarisation
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\rho$	[A·s/m <sup>3</sup> = C/m <sup>3</sup> ]	elektrische Raumladungsdichte
$\tau$	[K bzw. °C]	Taupunkt
$\nu$	[kg/(m·s) = N·s/m <sup>2</sup> = Pa·s]	dynamische Viskosität
$\varphi$	[V]	komplexes skalares Potential
$\omega$	[1/s = Hz]	Kreisfrequenz
$a$	[m]	Abstand
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Fläche
AIS	[-]	Air Insulated Switchgear
$B$	[kg/(A·s <sup>2</sup> ) = V·s/m <sup>2</sup> = T]	magnetische Flußdichte
$\vec{B}$	[kg/(A·s <sup>2</sup> ) = V·s/m <sup>2</sup> = T]	komplexe vektorielle magnetische Flußdichte
$c$	[1]	Konstante
$C$	[A <sup>2</sup> ·s <sup>4</sup> /(kg·m <sup>2</sup> ) = C/V = F]	Kapazität
CCD	[-]	Charge Coupled Device
$d$	[m]	Durchmesser

Symbol	Einheiten	Bezeichnung
D	$[A \cdot s / (m^2) = C / m^2]$	dielektrische Verschiebungsdichte
$\vec{D}$	$[A \cdot s / (m^2) = C / m^2]$	komplexe vektorielle dielektrische Verschiebungsdichte
dest.	[-]	destilliert
div	[-]	mathematischer Operator: Divergenz
E	$[kg \cdot m / (A \cdot s^3) = V / m]$	elektrische Feldstärke
$\vec{E}$	$[kg \cdot m / (A \cdot s^3) = V / m]$	vektorielle komplexe elektrische Feldstärke
E <sub>d</sub>	$[kg \cdot m / (A \cdot s^3) = V / m]$	elektrische Durchschlagsfeldstärke
E <sub>geladen</sub>	$[kg \cdot m / (A \cdot s^3) = V / m]$	elektrische Feldstärke eines geladenen Tropfens
E <sub>kr</sub>	$[kg \cdot m / (A \cdot s^3) = V / m]$	kritische elektrische Feldstärke
E <sub>kr_geladen</sub>	$[kg \cdot m / (A \cdot s^3) = V / m]$	kritische elektrische Feldstärke eines geladenen Tropfens
EN	[-]	Elektronegativität
f	$[1/s = Hz]$	Frequenz
F	$[kg \cdot m / s^2 = N]$	Kraft
FK	[-]	Fremdschichtklasse
G	[-]	engl. Gap, d.h. Funkenstrecke
GIS	[-]	Gas Insulated Switchgear
grad	[-]	mathematischer Operator: Gradient
h	[m]	Höhe
H	[A/m]	magnetische Feldstärke
$\vec{H}$	[A/m]	vektorielle komplexe magnetische Feldstärke
HC	[-]	Hydrophobieklasse
I	[A]	Strom, Effektivwert
IEC	[-]	International Electrotechnical Commission
j	[-]	komplexe Zahl
J	$[A / m^2]$	Stromdichte
$\vec{J}$	$[A / m^2]$	komplexe vektorielle Stromdichte
$\vec{J}_E$	$[A / m^2]$	komplexe vektorielle eingeprägte Stromdichte
l	[m]	Länge
L	$[kg \cdot m^2 / A^2 \cdot s^2 = V \cdot s / A = H]$	Induktivität
m	[m/s]	Geradensteigung
m <sub>r</sub>	[1]	relative Molekülmasse
m <sub>H</sub>	[1]	relative Molekülmasse von Wasserstoff
m <sub>O</sub>	[1]	relative Molekülmasse von Sauerstoff
M	[-]	Mittelpunkt

Symbol	Einheiten	Bezeichnung
p	$[\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2) = \text{N}/\text{m}^2 = \text{Pa}]$	Druck
p	$[\text{A}\cdot\text{s}\cdot\text{m} = \text{C}\cdot\text{m}]$	elektrisches Dipolmoment
Q	$[\text{A}\cdot\text{s} = \text{C}]$	Ladung
Q <sub>R</sub>	$[\text{A}\cdot\text{s} = \text{C}]$	Rayleigh Ladung
r	$[\text{m}]$	Radius
r <sub>L</sub>	$[\text{m}]$	linker Radius
r <sub>R</sub>	$[\text{m}]$	rechter Radius
r.F.	$[\%]$	relative Feuchte
rot	$[-]$	mathematischer Operator: Rotation
R	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2/(\text{s}^3\cdot\text{A}^2) = \text{V}/\text{A} = \Omega]$	elektrischer Widerstand
RAM	$[-]$	Random Access Memory
S	$[\text{kg}/\text{s}^2 = \text{N}/\text{m}]$	Speitungskoeffizient
S	$[-]$	Tropfenscheitelpunkt
SF <sub>6</sub>	$[-]$	Schwefelhexafluorid
t	$[\text{s}]$	Zeit
T	$[\text{s}]$	Periodendauer
TP	$[-]$	Tripelpunkt
TE	$[-]$	Teilentladung
TTL	$[-]$	Transistor-Transistor-Logik
u	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2/(\text{A}\cdot\text{s}^3) = \text{V}]$	Spannung, Gleichspannung
û	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2/(\text{A}\cdot\text{s}^3) = \text{V}]$	Spannung, Amplitude
û <sub>OE</sub>	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2/(\text{A}\cdot\text{s}^3) = \text{V}]$	Oberflächenwellen-Einsetzspannung, Amplitude
U	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2/(\text{A}\cdot\text{s}^3) = \text{V}]$	Spannung, Effektivwert
U <sub>m</sub>	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2/(\text{A}\cdot\text{s}^3) = \text{V}]$	Nennspannung, Effektivwert
ü	$[1]$	Übersetzungsverhältnis
v	$[\text{m}/\text{s}]$	Geschwindigkeit
V	$[\text{m}^3 \text{ bzw. l}]$	Volumen
W <sub>ad</sub>	$[\text{kg}/\text{s}^2 = \text{N}/\text{m}]$	Adhäsionsarbeit
W <sub>c</sub>	$[\text{kg}/\text{s}^2 = \text{N}/\text{m}]$	Kohäsionsarbeit
x	$[\text{m}]$	Koordinate
x <sub>0</sub>	$[\text{m}]$	Achsenabschnitt x-Koordinate
x <sub>1</sub>	$[\text{m}]$	Achsenabschnitt x-Koordinate
y	$[\text{m}]$	Koordinate
y <sub>0</sub>	$[\text{m}]$	Achsenabschnitt y-Koordinate
y <sub>1</sub>	$[\text{m}]$	Achsenabschnitt y-Koordinate
z	$[\text{m}]$	Koordinate
z <sub>0</sub>	$[\text{m}]$	Achsenabschnitt z-Koordinate
z <sub>1</sub>	$[\text{m}]$	Achsenabschnitt z-Koordinate



# Anhang





## **A Versuchstechniken zur Alterung und Diagnose**

### **A 1 Inhalt des Anhangs**

Die vorliegende Arbeit basiert auf dem Hintergrundwissen und den Erfahrungen bei der Anwendung der im folgenden beschriebenen Versuchstechniken zur Alterung von Isolierwerkstoffen im Labor und deren Diagnose und Bewertung. In diesem Anhang wird zunächst eine Übersicht über wesentliche Prüfverfahren gegeben. Danach folgt eine Vorstellung der Versuchstechniken, die am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität eingesetzt werden. Diese werden detailliert beschrieben und deren Funktionsweise erläutert.

### **A 2 Prüfungen zur Bewertung von Isolierstoffsystemen**

Die in einem Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik eingesetzten Isolierwerkstoffe werden in einem frühen Stadium einer Produktentwicklung sorgfältig ausgewählt, damit ein langjähriger fehlerfreier Betrieb gewährleistet wird. Bei der Auswahl des Isolierstoffes werden standardisierte Werkstoffprüfverfahren herangezogen. In Komponentenprüfungen wird das Zusammenwirken des ausgewählten Materials und dessen Formgebung untersucht. Zur Beurteilung der dielektrischen Festigkeit wird das entwickelte Betriebsmittel in Typ- oder Stückprüfungen standardisierten Prüfverfahren unterzogen. Zur Beurteilung des Langzeitverhaltens eines Betriebsmittels gibt es nur wenige standardisierte Verfahren, die eine Alterungsprüfung vorsehen. Diese Verfahren finden vorwiegend in der Schaltanlagentechnik Anwendung, da hier die komplexen Anlagen unter erschwerten Umgebungsbedingungen ein völlig anderes Verhalten zeigen können als die einzelnen Komponenten ohne Schaltanlagengehäuse. Die Grenzflächen bei einer Kombination mehrerer Bauteile sind von großer Bedeutung und stellen oft die kritischen Bereiche einer elektrischen Anlage der Energietechnik dar [12].

Bild A.1 zeigt eine zeitliche Abfolge möglicher Prüfungen von der Materialauswahl bis zum Betriebsmittel als Endprodukt. In den Tabellen A.1, A.2 und A.3 werden einige Beispiele für Materialprüfungen, Komponentenprüfungen und Betriebsmittelprüfungen gegeben.

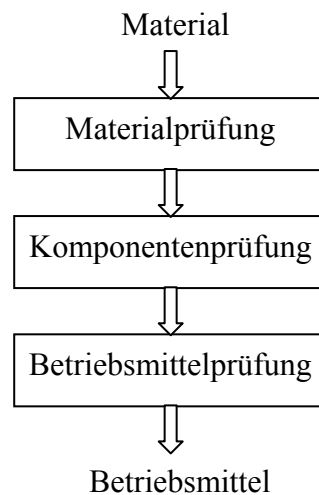


Bild A.1: Zeitliche Abfolge möglicher Prüfungen im Labor

Tabelle A.1: Beispiele für Bewertungen von festen Isolierwerkstoffen

<b>Materialprüfungen</b>		
<u>Ziel:</u> Wahl von geeigneten Isolierwerkstoffen		
Alterungs- verhalten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• inverse Klimakammer</li> <li>• Radtest</li> <li>• Niederspannungs-kriechstromfestigkeit</li> <li>• Hochspannungs-kriechstromfestigkeit</li> <li>• Zyklische Prüfungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kein standardisiertes Verfahren</li> <li>• IEC 61302 [123]</li> <li>• IEC 60112 [124]</li> <li>• IEC 60587 [125] und ASTM D 2303 [126]</li> <li>• IEC 61109 [127]</li> </ul>
Elektrische Kenngrößen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oberflächenwiderstand</li> <li>• Dielektrischer Verlustfaktor</li> <li>• Durchschlagsfestigkeit</li> <li>• Dielektrizitätskonstante</li> <li>• Spezifischer Durchgangswiderstand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IEC 60093 [128]</li> <li>• IEC 60250 [129]</li> <li>• IEC 60243-1 [130]</li> <li>• IEC 60250 [129]</li> <li>• IEC 60093 [128]</li> </ul>
Mechanische Kenngrößen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reißfestigkeit</li> <li>• Reißdehnung</li> <li>• Härte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DIN 53504 [131]</li> <li>• DIN 53504 [131]</li> <li>• DIN 53505 [132]</li> </ul>
Thermische Kenngrößen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entflammbarkeit</li> <li>• Lichtbogenfestigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IEC 60707 [133]</li> <li>• IEC 60243 [130]</li> </ul>

Tabelle A.2: Beispiele für Bewertungen von Komponenten

<b>Komponentenprüfungen</b>		
<u>Ziel:</u> Überprüfung des Zusammenwirkens von Material und Geometrie		
Alterungsverhalten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Radtest</li> <li>• Zyklische Prüfungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IEC 61302 [123]</li> <li>• IEC 61109 [127]</li> </ul>
Fremdschichtverhalten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Haftende Fremdschichten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IEC 60507 [20]</li> </ul>
Elektrische Kenngrößen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchführungen als Komponenten z.B. von Transformatoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IEC 60137 [134]</li> </ul>

Tabelle A.3: Beispiele für Bewertungen von Betriebsmitteln

<b>Betriebsmittelprüfungen</b>		
<u>Ziel:</u> Überprüfung der Betriebssicherheit unter realen Bedingungen		
Alterungsverhalten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Klimaprüfungen</li> <li>• Klimadichtigkeitsprüfung</li> <li>• Feuchteprüfung Wechselstromschaltgeräte</li> <li>• Zyklische Prüfungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IEC Report 932 [21]</li> <li>• IEC 60068 [135], [136]</li> <li>• IEC 60466 [30]</li> <li>• IEC 61109 [127]</li> </ul>
Fremdschichtverhalten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Haftende Fremdschichten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IEC 60507 [20]</li> </ul>
Dielektrische Prüfungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leistungsschalter</li> <li>• Schaltanlagen</li> <li>• Gasisolierte Schaltanlagen</li> <li>• Transformatoren</li> <li>• Stromwandler</li> <li>• Spannungswandler</li> <li>• Überspannungsableiter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IEC 60694 [137]</li> <li>• IEC 60694 [137]</li> <li>• IEC 60517 [138]</li> <li>• IEC 60076 [139]</li> <li>• IEC 60044-1 [140]</li> <li>• IEC 60044-2 [141]</li> <li>• IEC 60099-4 [142]</li> </ul>
Thermisches und mechanisches Verhalten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Störlichtbogenprüfungen an luftisolierten Schaltanlagen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PEHLA-Richtlinien</li> </ul>

### **A 3 Alterung von Isolierwerkstoffen im Labor**

#### **A 3.1 Hintergrund zur Prüfung von Isolierwerkstoffen**

Die Untersuchungen zur Alterung von Isolierwerkstoffen im Labor werden mit beschleunigenden Alterungsverfahren durchgeführt, um das Langzeitverhalten von Werkstoffen, Komponenten und Betriebsmitteln zu bewerten, bevor diese im Dauerbetrieb in den Anlagen der elektrischen Energietechnik eingesetzt werden. Für Forschungszwecke werden zahlreiche standardisierte und nichtstandardisierte zeitraffende Alterungsverfahren eingesetzt, mit dem Ziel Alterungsmechanismen zu klären. Bei diesen Prüfungen ist es entscheidend trotz der eingesetzten Beschleunigungsfaktoren, eine Veränderung des Alterungsmechanismus gegenüber realen Alterungserscheinungen bei Betriebsmitteln im elektrischen Netz zu vermeiden. Bei den Prüfverfahren zur Alterung ist zwischen den unterschiedlichen Bedingungen der Innenraum- und Freilufttechnik zu unterscheiden. In einigen Fällen werden daher Prüfverfahren an die jeweilige Bedingungen angepaßt, so daß daraus nichtstandardisierte Verfahren entstehen, die für den Anwendungsfall besser geeignet erscheinen.

Im folgenden werden einige Prüfverfahren vorgestellt, die am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt für die Alterung unter Innenraumbedingungen eingesetzt werden und in zahlreichen Veröffentlichungen vorgestellt werden, z.B. in [13], [14], [15], [16], [17], [22], [24], [52], [143], [144], [145], [146], [147], [148], [149], [150] und [151]. Tabelle 5.4 gibt einen Überblick über die installierten Prüfeinrichtungen zur Alterung von festen Isolierwerkstoffen im Labor. In dieser Tabelle werden jeder Prüfanlage Bewertungsmöglichkeiten in Form von Material-, Komponenten- oder Betriebsmittelprüfungen zugeordnet, wobei die Abmessungen der Prüfanlagen nur hierfür angepaßte, bzw. von ihren geometrischen Gegebenheiten geeignete Prüflinge zur Prüfung zulassen. Die unterschiedlichen Arten der hervorgerufenen Befeuchtung in den Anlagen werden ebenfalls in der folgenden Übersicht den Prüfanlagen zugeordnet.

Tabelle A.4: Prüfeinrichtungen zur Alterung von Isolierstoffsystemen am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt

<b>Prüfanlage</b>	<b>Mögliche Prüfungen zur Bewertung von</b>	<b>Geometrie des Prüfkörpers</b>	<b>Befeuchtungsart</b>
Inverse Klimakammer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materialien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zylinderförmige hohlgebohrte Modellprüfkörper</li> </ul>	Kondensation durch Taupunktunterschreitung
Kaltnebelkammer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materialien</li> <li>• Komponenten</li> <li>• Betriebsmittel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modellprüfkörper</li> <li>• Einzelkomponenten</li> <li>• Betriebsmittel mit geringen geometrischen Abmessungen</li> </ul>	Mechanisches Versprühen von Prüflösungen definierter Leitfähigkeit
Klimakammer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materialien</li> <li>• Komponenten</li> <li>• Betriebsmittel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modellprüfkörper</li> <li>• Einzelkomponenten</li> <li>• Betriebsmittel</li> </ul>	Kondensation durch Taupunktunterschreitung
Modifizierter Radtest	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materialien</li> <li>• Komponenten</li> <li>• Betriebsmittel mit geringen Abmessungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zylinderförmige Modellprüfkörper</li> <li>• stabförmige Komponenten</li> <li>• z.B. Mittelspannungsableiter</li> </ul>	Eintauchen in einen Behälter mit einer Prüflösung definierter Leitfähigkeit
Anlage zur Prüfung der Kriechstromfestigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materialien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• plattenförmige Modellprüfkörper</li> </ul>	Auftropfen einer definierten Prüflösung bei einstellbarer Flüssigkeitsmenge

### A 3.2 Inverse Klimakammer

Die Alterungsmethode in der Inversen Klimakammer berücksichtigt realitätsnahe Betauungsvorgänge von Innenraumschaltanlagen, die durch Temperatur- und Feuchteschwankungen hervorgerufen werden. Es werden typische Innenraumbedingungen, charakterisiert durch hohe elektrische Feldstärken und schwach leitende Fremdschichten, in einem abgeschlossenen Prüfgefäß nachgebildet. Eine mögliche Ausführungsform der Alterungsmethode „Inverse Klimakammer“ ist ein zylinderförmiger geschlossener Behälter. Dieser ist mit detailliertem Innenaufbau in Bild A.2 [79] dargestellt. Der gleichzeitige Betrieb von mehreren dieser dargestellten Kammern ist möglich.

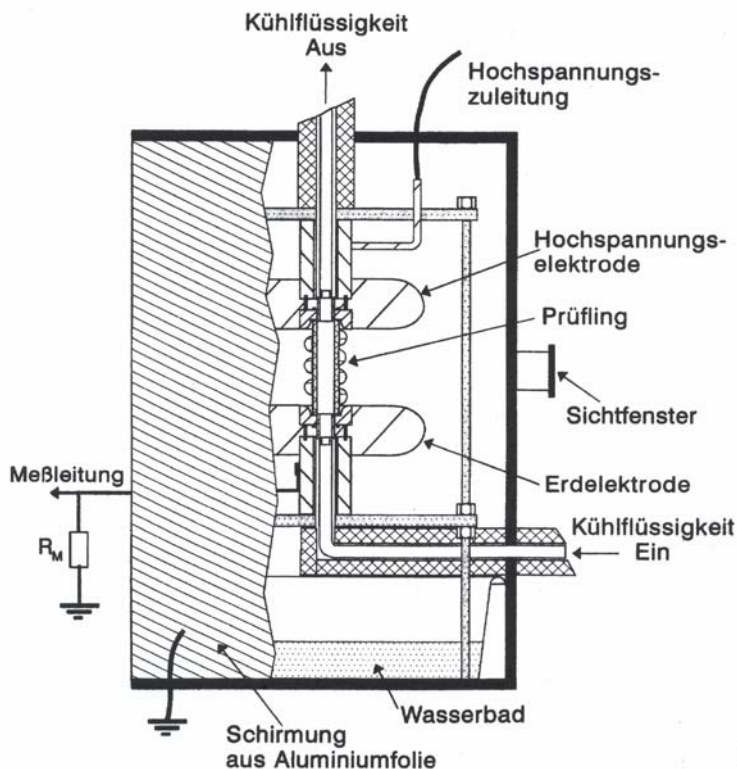


Bild A.2: Prüfgefäß der Inversen Klimakammer mit eingebautem zylinderförmigen hohlgebohrtem Isolierprüfkörper [79]

In dem Prüfgefäß befindet sich ein vertikal montierter zylinderförmiger hohlgebohrter Isolierstoffprüfkörper, durch dessen axiale Bohrung ein Isolieröl als Kühlmittel innerhalb eines geschlossenen Kreislaufes gepumpt wird. Die Regeleinrichtung des temperierbaren Isolieröls erzeugt unter Berücksichtigung der

gemessenen Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte im Inneren des Prüfgefäßes eine Taupunktunterschreitung auf der Oberfläche des Prüfkörpers, so daß sich dort ein Kondensat absetzt, das in einer Schale innerhalb des Prüfgefäßes bereit gehalten wird. Durch die Wahl der regelbaren Kühlmitteltemperatur kann eine Dauerbetauung oder eine zyklische Betauung eingestellt werden. Während der Feuchteeinwirkung ist der Isolierstoffprüfkörper zwischen zwei Edelstahlelektroden mit Rogowski-Profilen eingebaut. An der oberen Elektrode liegt die Prüfwechselspannung an. Die untere Elektrode ist mit einem in Reihe liegenden Meßshunt an das Erdpotential angeschlossen. Über den Meßshunt kann kontinuierlich der Ableitstrom und dessen Phasenwinkel bezüglich der anliegenden Hochspannung mit Hilfe digitaler Meßwerterfassungseinrichtungen diagnostiziert werden.

In den Arbeiten [51], [79], [80], [81] werden Epoxidharz-Formstoff- und Polyurethanharz-Formstoff-Prüfkörper in der Inversen Klimakammer gealtert, um eine Reihung von Prüfkörpern unterschiedlicher Formstoff-Komponenten bezüglich ihrer Alterungsbeständigkeit aufstellen zu können. Die dabei verwendeten Prüfkörper haben eine Länge von 10 cm, einen Außendurchmesser von 3 cm und eine zylindrische Längsbohrung mit einem Durchmesser von 2 cm. Als Prüfgefäße werden Glasgefäße mit einem Volumen von 45 Litern und Gefäße aus Polyvinylchlorid mit einem Volumen von 88 Litern eingesetzt [51]. Für die angelegte Hochspannung wird  $U = 20 \text{ kV}$  mit  $f = 50 \text{ Hz}$  [81] gewählt, was zu einer elektrischen Feldstärke auf der Isolierstoffoberfläche des Prüfkörpers von  $2 \text{ kV/cm}$  [81] führt. Die Volumenleitfähigkeit des Kondensats ist kleiner als  $10 \text{ }\mu\text{S/cm}$  [79]. Durch die Temperaturregelung des Isolieröls, das im Inneren des Prüfkörpers fließt, wird bei Dauerbetauung eine Feuchtemenge von  $0,01 \text{ g/cm}^3$  auf der Isolierstoffoberfläche erzeugt. Bei der zyklischen Betauung mit einem Zyklus von 24 Stunden, davon 16 Stunden Unterkühlung und 8 Stunden Erwärmung der Isolierstoffoberfläche, stellen sich Feuchtemengen größer als  $0,01 \text{ g/cm}^3$  [81] auf der Prüfkörperoberfläche ein. Es werden bei [81] Dauerversuche bis über 25 000 Stunden durchgeführt.



### A 3.3 Kaltnebelkammer

Eine Kaltnebelkammer ist ein abgeschlossener Raum, in dem Prüfkörper bei 100 % Luftfeuchte und gleichzeitiger Spannungsbeanspruchung gealtert werden. Der Name Kaltnebel beschreibt die Art der Erzeugung der Luftfeuchte. Es handelt sich hierbei um mechanisch, also im kalten Zustand, versprühtes Wasser. Im Gegensatz hierzu gibt es auch Verfahren, bei denen sich Wasser durch Verdunstung, also durch Erwärmung, in Wasserdampf wandelt und somit die hohe Luftfeuchte im Prüfraum erzeugt.

Im Dauerversuchsstand Kaltnebelkammer, in Bild A.3 dargestellt, wird entionisiertes Wasser versprüht, das zuvor durch die Zugabe von Salzen eine definierte Volumenleitfähigkeit erhält. Die Prüflösung wird in einem Vorratbehälter bereitgehalten und kontinuierlich den Zerstäubern im Inneren der Kammer zugeführt. In der Kammer können sowohl Modellprüfkörper, Isolierstoffkomponenten und in Abhängigkeit des Raumbedarfs und der erforderlichen Prüfspannung auch Betriebsmittel gealtert werden. Beim gleichzeitigen Einwirken der anliegenden Prüfwechselspannung und einer relativen Luftfeuchte von 100 %, die fließende Fremdschichten auf der Prüfkörperoberfläche hervorruft, wird als Diagnosegröße der Ableitstrom am Prüfkörper mit dazugehörigem Phasenwinkel über einen Meßshunt gegen Erde kontinuierlich gemessen. Durch die langfristige Veränderung des Ableitstromes von einem kapazitiven Verhalten zu einem ohmschen Verhalten kann der Fortschritt der Alterung charakterisiert werden.



Bild A.3: Kaltnebelkammer

Die in [51], [80] und [81] eingesetzte Kaltnebelkammer wurde durch eine im Rahmen dieser Arbeit neu erbaute Kaltnebelkammer ersetzt. Diese ist ein gefliester Raum mit einer Grundfläche von  $5 \text{ m}^2$  und einer Höhe von  $2,0 \text{ m}$ . In der Kammer können sowohl einphasige als auch zweiphasige Prüfungen durchgeführt werden. In den Prüfraum führen zwei einphasige VPE-Kabel der Nennspannung  $U_m = 24 \text{ kV}$ , die mit jeweils einem Kabelendverschluß der Nennspannung  $U_m = 36 \text{ kV}$  abgeschlossen sind. An diese werden die Prüfobjekte angeschlossen. Die Hochspannungserzeugung erfolgt mit zwei einphasigen Transformatoren mit den Nenndaten  $U_m = 26 \text{ kV}$ ,  $S = 30 \text{ kVA}$ . Zur Strombegrenzung im Kurzschlußfall am Prüfkörper wirkt jeweils ein Wasserwiderstand. Zur Glättung der Spannung wird in jeder Phase ein Stützkondensator, bestehend aus jeweils drei Kondensatoren mit  $C = 3400 \text{ pF}$  eingesetzt. Zur Erzeugung einer relativen Luftfeuchte von  $100 \%$  im Inneren des Prüfraumes wird die Prüflösung, entionisiertes Wasser mit einer durch die Zugabe von Salzen definierten Volumenleitfähigkeit, in einem Vorratsbehälter von  $300 \text{ Liter}$  Fassungsvermögen bereitgestellt. Die an diesen Behälter angeschlossen Wasserzerstäuber, Typ 505 der Firma Defensor, mit einer Sprühleistung von  $0,8 \text{ Liter pro Stunde}$  zerstäuben im Inneren der Kammer kontinuierlich die Prüflösung mit einer Tropfendurchmesser von  $5$  bis  $10 \text{ }\mu\text{m}$ . Eine Erweiterung zur bisher eingesetzten Kammer ist eine Temperaturregelung im Inneren des Prüfraumes. Mit Hilfe eines Thermostates und eines Wärmetauschers kann die Temperatur im Inneren der Kammer, unabhängig von der Außentemperatur, über einen Kühlkreislauf nahezu auf einem konstanten Wert im Bereich der Raumtemperatur gehalten werden. Zusätzlich schützt eine umhüllende Wärmeisolation, die sich zwischen den Edelstahlwänden der Außenhülle und den Fliesen der Innenwände befindet, die Kaltnebelkammer vor starken Temperaturschwankungen der Umgebungsluft. Während der gesamten Prüfdauer können die anliegende Hochspannung und bis zu  $16$  Ableitströme und deren Phasenwinkel kontinuierlich erfaßt und digital weiterverarbeitet werden.

Weltweit wird die Methode der Alterung mit Salznebel unter gleichzeitiger Spannungsbeanspruchung auf unterschiedliche Weisen praktiziert. Es sind sehr viele Parameterkombinationen aus Volumenleitfähigkeit, Sprühdauer und elektrischer Beanspruchung zu finden, die in [81] zusammengestellt sind.

### A 2.4 Klimakammer

In der Klimakammer können Modellprüfkörper, Anlagenkomponenten und Betriebsmittel, wie z.B. Mittelspannungsschaltanlagen und Trockentransformatoren, unter extremen Klimabedingungen geprüft werden. Die Anlage, in Bild A.4 und Bild A.5 dargestellt, besteht aus einem Prüfraum, einem davon abgetrennten Raum für die Hochspannungserzeugung und einem Raum für die Klima- und Regelungstechnik. Im Prüfraum mit einem Volumen von etwa  $17 \text{ m}^3$  können die Prüfobjekte sowohl bei konstanter Temperatur und einstellbarer Feuchte als auch bei zyklischen Temperatur- und Feuchteschwankungen Alterungsprüfungen bei gleichzeitig angelegter Wechselspannung unterzogen werden. Die Hochspannung wird mit drei einphasigen Prüftransformatoren mit einer Nennspannung von  $U = 100 \text{ kV}$  erzeugt und über drei einphasige Durchführungen in den Prüfraum geleitet. Mit den Einrichtungen der Klimatechnik können im Inneren des Prüfraumes Temperaturen von  $-20^\circ \text{ C}$  bis  $+60^\circ \text{ C}$  und im Klimabetrieb relative Feuchten von bis zu 95 % erzeugt werden. Durch die Anbindung der Anlage über eine digitale Schnittstelle an eine Regelungssoftware können Temperatur- und Feuchtezyklen programmiert werden, die durch den kontinuierlichen Vergleich der Ist- und Sollwerte von der Anlage eingestellt werden. Während einer Alterungsprüfung kann der Ableitstrom zur Diagnose des Zustandes der Isolierkomponenten gemessen werden. Durch eine Schirmung der Klimakammer in Form einer Edelstahlverkleidung und durch Hochfrequenzfilter in den Zuleitungen können auch Teilentladungsmessungen im Inneren des Prüfraumes durchgeführt werden.

Temperatur- und Feuchtezyklen zur beschleunigten Alterung werden u.a. im IEC Report 932 [21] vorgeschlagen, um Innenraumschaltanlagen und Schaltanlagenkomponenten der Mittelspannungstechnik unter extremen Einsatzbedingungen im Labor zu prüfen. In der hier vorgestellten Klimakammer erlaubt die dreiphasige Hochspannungserzeugung eine realistische Nachbildung der vorhandenen Betriebsbedingungen am späteren Einsatzort. In [26], [27] werden mit der beschriebenen Klimakammer Prüfungen an Mittelspannungs-Schaltanlagen nach IEC Report 932 durchgeführt.



Bild A.4: Klimakammer



Bild A.5: Prüfraum der Klimakammer mit installiertem Prüfobjekt

### A 3.5 Modifizierter Radtest

Im Dauerversuchsstand Modifizierter Radtest werden zylinderförmige Prüfkörper unter zyklischer Feuchte- und Spannungsbeanspruchung gealtert. Der Versuchsaufbau wird hier Modifizierter Radtest genannt, da dieser nicht standardisiert ist und zu dem genormten Radtest [123] Unterschiede aufweist. In dem hier vorgestellten Aufbau werden jeweils vier Prüfkörper radial an einem Rad

montiert. An zwei gleichzeitig rotierenden Rädern, die über eine gemeinsame Achse angetrieben werden, können insgesamt acht Prüfkörper gleichzeitig gealtert werden können.

Im Dauerversuch bewegen sich die Prüfkörper auf einer Kreisbahn jeweils um eine Position von  $90^\circ$  und durchlaufen innerhalb einer Umdrehung des Rades vier verschiedene Prüfphasen. In der unteren Position taucht der vertikale Prüfkörper in eine Prüflösung mit definierter Volumenleitfähigkeit ein. Nach dieser Befeuchtungsphase gelangt er nach einer Raddrehung von  $90^\circ$  in eine horizontale Position, in der die Feuchte von der Isolierstoffoberfläche abtropfen kann. Nach einer weiteren Bewegung des Rades um  $90^\circ$  wird der Prüfkörper mit der Prüfwechselspannung belastet. Die letzte Phase des Prüfzyklus ist eine Ruhephase ohne Spannungs- oder Feuchtebeanspruchung. Danach beginnt erneut der nächste Zyklus mit dem Eintauchen des Isolierwerkstoffes in die Prüflösung. Der Versuchsaufbau mit den beiden Rädern und acht montierten Prüfkörpern wird in Bild A.6 gezeigt.



Bild A.6: Modifizierter Radtest

Bei den durchgeführten Untersuchungen, beschrieben in [81], wird für jede der vier Phasen des Prüfzyklus eine Dauer von einer Minute festgelegt. Die Volumenleitfähigkeit der Prüflösung, bestehend aus entionisiertem Wasser durch die Zugabe von Salzen, beträgt  $\kappa = 500 \mu\text{S/cm}$ . Die Prüfkörper werden mit einer Wechselfspannung von  $U = 8 \text{ kV}$  bei  $f = 50 \text{ Hz}$  belastet. Das Ausfallkriterium für

einen Prüfkörper ist eine maximal auftretende Stromamplitude im Ableitstrom von mindestens  $\hat{i} = 500 \mu\text{A}$  bei zehn aufeinander folgenden Zyklen. Das hier nicht genormte Alterungsverfahren wird in ähnlicher Form vielfältig eingesetzt und u.a. in [152], [153], [154] und [155] beschrieben. In [81] werden verschiedene Ausführungsformen des Radtestes und die dabei verwendeten Beanspruchungsparameter gegenübergestellt.

### **A 3.6 Versuchstechnik zur Prüfung der Kriechstromfestigkeit**

Eine Prüfung der Kriechstromfestigkeit fester Isolierstoffe bei Belastung mit Hochspannung erfolgt im Schiefe-Ebene-Test, bei dem die Beständigkeit gegen Erosion unter der Einwirkung von Feuchte im Vordergrund steht. Es werden dabei plattenförmige Isolierstoffkörper unter einem Neigungswinkel von  $45^\circ$  mit montierten Edelstahlelektroden im Abstand von 50 mm auf der Probenunterseite benetzt. Die Anordnung wird in Bild A.7 [125], [126] verdeutlicht. Als Prüflösung wird destilliertes Wasser mit der Zugabe eines Benetzungsmittels verwendet. Über eine Dosiervorrichtung werden definierte Flüssigkeitsmengen kontinuierlich auf ein Filterpapier an der oberen Edelstahlelektrode getropft. Der Prüfkörper wird durch die abfließenden Flüssigkeitsmengen zwischen den beiden Elektroden bei gleichzeitig anliegender Wechselspannung benetzt.

Das Prüfverfahren dieser Werkstoffprüfung ist in IEC 60587 [125] und in ASTM D 2303 [126] definiert und wird dort „Inclined Plane Test“ genannt. Die Geometrien der Elektroden nach den beiden standardisierten Prüfverfahren unterscheiden sich geringfügig. In beiden Normen werden zwei Ausfallkriterien definiert, mit denen das geprüfte Material charakterisiert wird. Bei dem ersten Ausfallkriterium wird der Ableitstrom herangezogen. Falls dieser für mehr als zwei Sekunden während der Prüfung einen Wert von  $I = 60 \text{ mA}$  überschreitet, ist die Prüfung nicht bestanden und beendet. Beim zweiten Ausfallkriterium entscheidet die Länge der Erosionsspur auf der Prüfkörperoberfläche zwischen den Elektroden. Ist die Spur in einer festgelegten Zeit kleiner als 25 mm, so wird die Prüfung als erfolgreich bewertet.

In Abhängigkeit der angelegten Wechselspannung von  $U = 450 \text{ V}$  bis  $U = 5 \text{ kV}$  während der Prüfung erfolgt nach bestandener Prüfung die Einordnung des

Isoliermaterials in eine nach Norm definierte Bewertungsklasse. In den beiden Normen IEC 60587 und ASTM D 2303 wird zwischen einer Stufenspannungsmethode und einer Festspannungsmethode unterschieden, die mit den beiden Ausfallkriterien jeweils kombiniert werden können.

In [79] wird für den Schiefe-Ebene-Test ein normgerechtes Gerät der Fa. AENEA eingesetzt, um eine Materialbewertung zwischen verschiedenen Epoxidharz-Formstoffen herauszufinden und eine Reihung aufzustellen. Das kompakte Gerät enthält alle nötigen Einstellungsmöglichkeiten für sowohl eine Festspannungsprüfung als auch für eine Stufenspannungsprüfung nach den beiden oben genannten Normen. Der Versuchsaufbau besteht aus einer Hochspannungserzeugung, einer Dosiereinrichtung, einer Be- und Entlüftung des Prüfraumes und einer Abschaltautomatik für das Überstrom-Ausschaltkriterium. In [79] werden unter Verwendung der Festspannungsmethode kombiniert mit dem Ausfallkriterium Stromüberschreitung von 60 mA plattenförmige Prüfkörper mit einer Länge von 120 mm und einer Breite von 50 mm bei  $U = 4,5$  kV bis maximal 6 Stunden der Prüfung unterzogen. In [81] werden Prüfungen an plattenförmigen Prüfkörpern mit einer Materialstärke von 6 mm bei  $U = 2,5$  kV und  $U = 3,5$  kV nach dem Ausfallkriterium von 60 mA über maximal 6 Stunden durchgeführt. In beiden Arbeiten [79] und [81] wird die Festspannungsmethode und das Ausfallkriterium der Stromüberschreitung gewählt. Das verwendete Kriterium bietet gegenüber dem zweiten Ausfallkriterium, bei dem die Länge der Erosionsspur zu beobachten ist, den Vorteil einer automatischen Erkennung des Ausfallkriteriums bei der Überschreitung von 60 mA.

Bild A.8 zeigt zwei verschiedene polymere plattenförmige Isolierstoff-Prüfkörper während einer Prüfung nach [125], [126] im oben beschriebenen Prüfgerät. Im linken Bild sind Entladungserscheinungen im Bereich vor der unteren Elektrode zu sehen. Im rechten Bild sind bereits ausgeprägte Kriechspuren mit Entladungserscheinungen oberhalb der unteren Elektrode erkennbar.

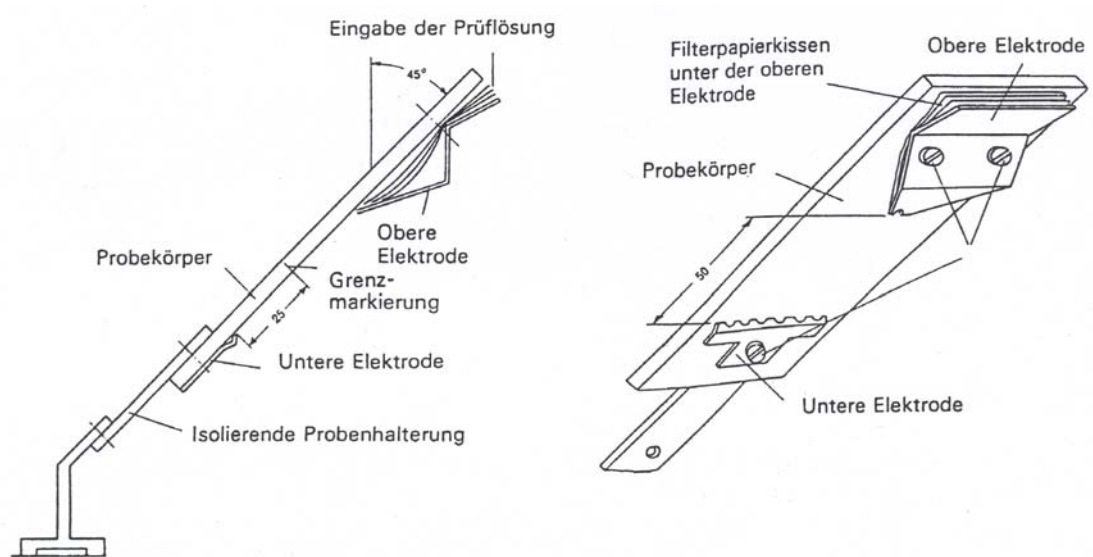


Bild A.7: Plattenförmiger Prüfkörper mit montierten Elektroden zur Prüfung der Kriechstromfestigkeit [125], [126], Angaben in mm

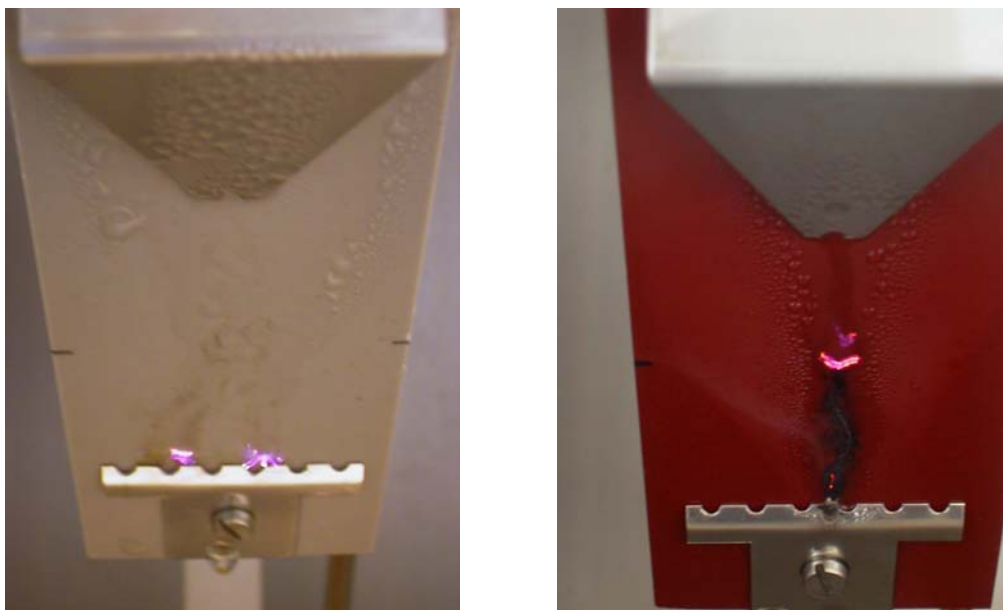


Bild A.8: Plattenförmige Prüfkörper mit Entladungserscheinungen während einer Prüfung der Kriechstromfestigkeit nach [125], [126]





## Lebenslauf

Familienname: Keim  
Vorname: Sabine  
Geburtsdatum: 10.04.1971  
Geburtsort: Frankfurt am Main

Schulbildung: 1978 - 1982  
Schillerschule in Dreieich, Grundschule  
1982 - 1984  
Heinrich-Heine-Schule in Dreieich, Gesamtschule  
1984 - 1991  
Ricarda-Huch-Schule in Dreieich, Gymnasium  
Allgemeine Hochschulreife 1991

Studium: 1991 - 1997  
Studium der Elektrotechnik an der  
Technischen Universität Darmstadt  
Schwerpunkt: Elektrische Energietechnik  
Diplom Oktober 1997

Grundpraktikum: 1991 - 1992, insgesamt 14 Wochen  
Fa. Helu Technik GmbH + CoKG, Dreieich  
Fa. Digital Equipment GmbH, Dreieich  
Fa. Döring + Silbermann GbR, Dreieich

Fachpraktikum: 1995, insgesamt 14 Wochen  
Fa. Siemens AG, Erlangen, Anlagentechnik

Studienarbeit: November 1996 - März 1997  
Druck- und Temperaturmessungen bei  
Störlichtbögen in metallgekapselten  
Mittelspannungsschaltanlagen,  
durchgeführt im Technischen Versuchsfeld der  
Siemens AG, Frankfurt am Main, Schaltanlagenwerk

Diplomarbeit: April 1997 - Juli 1997  
Schutzbereich eines MO-Ableiters zum Schutz eines  
245 kV-Einkammer-SF<sub>6</sub>-Leistungsschalters bei  
Blitzüberspannungen,  
durchgeführt im Höchstspannungslabor der  
Technischen Universität Darmstadt,  
Fachgebiet Hochspannungstechnik

Wissenschaftliche Tätigkeit: November 1997 - April 2003  
Wissenschaftliche Mitarbeiterin am  
Fachgebiet Hochspannungstechnik der  
Technischen Universität Darmstadt